

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Návrh a posouzení dodatečně předpjatých stropních desek

Design and assessment of post tensioned slabs

Student:

Bc. Vojtěch Mičaník

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavlína Matečková, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Mičaník**
Studijní program: N3507 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb
Téma: **Návrh a posouzení dodatečně předpjatých stropních desek**
Design and assessment of post tensioned slab
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je vypracovat alternativní návrhy předpjaté stropní konstrukce nad daným půdorysem. Pro návrh konstrukce se předpokládá použití zjednodušených výpočtových metod, pomocí kterých se problém návrhu předpětí převede na 1D úlohu. Účinky předpětí na konstrukce budou vypočteny pomocí MKP a následné posouzení podle platných norem bude provedeno numerickými metodami s využitím výpočetní techniky. Práce bude vycházet z reálného zadání stropní konstrukce budovy, detailní návrh a řešení budovy však nebude tématem práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN EN 1991 Eurokód 1: Zatížení stavebních konstrukcí.
ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
Navrátil, J.: Předpjaté betonové konstrukce. CERM 2004
Navrátil, J.: Prestressed concrete structure, VSB - Technical University of Ostrava, 2014

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavlína Matečková, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2017

Datum odevzdání: 01.12.2017

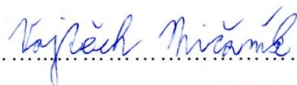

doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 1. 12. 2017

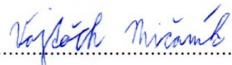
..... 

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 1.12.2017


.....
podpis studenta

Anotace

MIČANÍK, Vojtěch. *Návrh a posouzení dodatečně předpjatých stropních desek*. Ostrava, 2017. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí. Rozsah 45 stran.

Diplomová práce se zabývá návrhem a posouzením předpjaté stropní desky s nepravidelně rozmístěnými podporami. Návrh a posouzení byly provedeno s pomocí softwaru pracujícího na bázi metody konečných prvků. Byl proveden návrh předpětí na 1D konstrukcích a následně ověřen na 3D modelu konstrukce. Předpětí bylo v konstrukci vedeno v zakřivených sloupových a deskových pruzích. Bylo zjištěno, že složitost konstrukce negativně ovlivňuje možnost vedení předpětí. Pomocí softwaru byla ověřena potřeba betonářské výztuže. Bylo vypočteny nelineární deformace a srovnány s normovými hodnotami. Bylo srovnáno varianta konstrukce s předpětím ve sloupových a deskových pruzích s konstrukcí s předpětím pouze ve sloupových pruzích.

Klíčová slova

dodatečně předpjatá deska, nelineární deformace, betonářská výztuž, metoda konečných prvků

Abstract

MIČANÍK, Vojtěch. *Návrh a posouzení dodatečně předpjatých stropních desek*. Ostrava, 2017. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí. Rozsah 45 stran.

The diploma thesis deals with design and assessment of the post tensioned slab with irregularly placed supports. Design and assessment were done with the help of FEM based software. The design of prestressed concrete 1D members was conducted and checked on the 3D structure afterwards. The prestressing was conducted in curved column and slab strips. It was found out the irregular ground plane has negative effect on the prestressing. With the help of software was checked the need of reinforcing steel. The non linear deformations was computed and compared with standard values. The version of the structure with prestressing in column and slab strips with the version of the structure with prestressing only in column strips were compared.

Keywords

post tensioned slab, non linear deformations, reinforcement steel, finite element method

Obsah

Seznam použitého značení	3
1. Úvod	4
2. Současný stav řešené problematiky.....	5
3. Krycí vrstva výztuže, materiálové charakteristiky a parametry předpětí	6
3.1 Stanovení krycí vrstvy betonářské výztuže:	6
3.2 Ověření krycí vrstvy předpínací výztuže:	6
3.3 Použité materiály a vstupní data výpočtu	6
4. Konstrukční řešení.....	8
5. Zatížení.....	10
5.1 Stálá zatížení	10
5.2 Užitná zatížení	11
5.3 Kombinace zatížení	12
6 Předpínací systém VSLab S	13
7. Návrh sloupového pruhu	17
7.1 Předpětí.....	20
7.2 Posouzení nad podporou	23
7.3 Posouzení v poli	25
8. Návrh průvlaku.....	27
8.1 Předpětí.....	29
8.2 Posouzení nad podporou	31
8.3 Posouzení v poli	33
9. Model konstrukce.....	35
10. Posouzení mezního stavu únosnosti	38
11. Posouzení mezního stavu použitelnosti.....	43
12. Varianta předpětí	47
13. Závěr.....	48

14. Poděkování	49
15. Seznam použitých pramenů.....	50
16. Přílohy	51

Seznam použitého značení

a_s	plocha betonářské výztuže [mm^2/m]
A	plocha průřezu [mm^2]
E	modul pružnosti [MPa]
M_{Ed}	návrhová hodnota účinků zatížení – ohybový moment [kNm]
N_{Ed}	návrhová hodnota účinků zatížení - normálová síla [kN]
V_{Ed}	návrhová hodnota účinků zatížení - posouvající síla [kN]
b	šířka průřezu [m]
b_{eff}	spolupůsobící šířka desky [m]
c_{min}	minimální krycí vrstva výztuže [mm]
c_{nom}	nominální krycí vrstva výztuže [mm]
f_{ck}	charakteristická pevnost betonu v tlaku [MPa]
f_{cm}	průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku [MPa]
f_{pk}	charakteristická hodnota pevnosti v tahu předpínací oceli [MPa]
$f_{\text{p0,1k}}$	smluvní mez kluzu 0,1% předpínací oceli
g_k	charakteristická hodnota stálého zatížení [kN/m; kN/m ²]
h	výška průřezu [m]
k	nezamýšlený úhlový posuv vnitřních předpínacích vložek [rad/m]
q_k	charakteristická hodnota užitného zatížení [kN/m; kN/m ²]
γ_c	objemová hmotnost (předpjatého) betonu [kN/m ³]
θ	kumulativní úhel ovinutí předpínací výztuže [°]
μ	součinitel tření pro dodatečně napínané vnitřní předpínací vložky [rad ⁻¹]
$\sigma_{\text{p,max}}$	maximální napínací napětí [MPa]
σ_{pm0}	mezní napětí bezprostředně po napnutí [MPa]
ψ	součinitelé, kterými se definují reprezentativní hodnoty proměnného zatížení [-]

1. Úvod

Předmětem práce je návrh předpětí pro železobetonovou stropní desku podepřenou nepravidelně rozmístěnými podporami. Půdorys stropní desky byl vytvořen na základě schématu, poskytnutého Katedrou konstrukcí FAST VŠB. Půdorys byl podle schématu vytvořen záměrně tak, aby velikost rozponů mezi podporujícími sloupy a stěnami vyžadovala použití předpjatého betonu. Pro návrh a posouzení byly použity programy pracující metodou konečných prvků, a sice IDEA StatiCa 8 (dále jen IDEA) a Dlubal RFEM 5.11 (dále jen RFEM) s moduly RF-TENDON a RF-CONCRETE Surfaces. Pro předběžný návrh napřímeného sloupového pruhu byl využit program IDEA. Z tohoto návrhu bylo zjištěn potřebný počet předpínacích kabelů dané pevnosti. Následně byly v programu AutoCAD do půdorysu rozkresleny křivky jednotlivých předpínacích kabelů, tvořené segmenty kružnic a tečnami. V této fázi bylo také zjištěno, že sloupy a stěny jsou rozmístěny až příliš nepravidelně a sloupové pruhy jsou proto příliš zakřivené. Veliké zakřivení sloupových pruhů razantně zvyšovalo kumulativní úhel ovinutí θ kabelů, a to vedlo k neúnosným ztrátám předpětí třením a tudíž k výraznému poklesu předpínací síly. Proto bylo přikročeno k úpravě půdorysu, kdy bylo manipulováno s některými podporami tak, aby sloupové pruhy byly přímější. Tuto úpravu lze chápat jako dohodu mezi statikem a architektem, kdy se hledá realizovatelná varianta díla se zřetelem na zachování maxima architektonických prvků. Po této úpravě byly v půdoryse definitivně rozkresleny křivky předpínacích kabelů, celý půdorys byl importován do programu RFEM a byl vytvořen model, na kterém probíhaly další výpočty. Model byl zatížen stálým a užitným zatížením a byl vytvořen zatěžovací stav „předpětí“. V betonové desce byly na základě importovaných křivek vytvořeny tzv. výsledkové pruty, které jsou samy o sobě nehmotné, stávají se však nositeli předpínacích kabelů. V modulu RF-TENDON byla následně vytvořena vertikální geometrie kabelů a zadány veškeré parametry související s předpětím. Po návratu do hlavního programu RFEM se do zatěžovacího stavu „předpětí“ importovalo ekvivalentní zatížení od předpětí, působící v místech výsledkových prutů. Model byl dále posouzen na mezní stav únosnosti a použitelnosti s pomocí modulu RF-CONCRETE Surfaces, který umí posuzovat železobetonové plochy. Předpětí do tohoto posouzení vstupovalo jako vnější zatížení.

2. Současný stav řešené problematiky

Předpjatý beton se v dnešní době používá při výstavbě náročných staveb a při výrobě prefabrikátů. Dodatečně předpjatý beton nachází své hlavní uplatnění v mostním stavitelství, dále se používá při výstavbě pozemních staveb s velkými rozpory nebo komplikovanou konstrukcí, kruhových nádrží, ochranných schránek jaderných reaktorů [1] a při realizaci dalších speciálních staveb. Výhody předepnutých (v případě této práce deskových konstrukcí) jsou: nižší tloušťka konstrukce a z toho vyplývající možné nižší zatížení základů, možnost realizovat větší rozpory, možné větší zatížení, menší průhyby, méně trhlin, snížení množství měkké výztuže, v určitých případech nižší pracnost a úspora nákladů. V závislosti na uspořádání předpínací výztuže jsou doporučené rozpory předpjatých desek 8-12 metrů.

Pro předpínání deskových konstrukcí se používají jednolánové systémy bez soudržnosti-tzv. monostrandy, nebo předpínací systémy v plochem kanálku se soudržností s dvěma až pěti lany. Systém v plochem kanálku se soudržností má lana uložena vedle sebe a při napínání kabelů zakřivených v rovině desky jednotlivá lana svou pozici v kanálku nemění. Po napnutí jsou kanálky zainjektovány, což mimo jiné umožňuje provádění prostupů, kdy je přerušen kabel – účinek předpětí se ztrácí pouze v konkrétním poli. Systém v plochem kanálku se soudržností lze použít v bezprůvlakové desce (to je případ této práce), časté je také použití v plochem průvlaku, který vystupuje s desky a nabízí vyšší účinnou výšku průřezu.

Příklady realizací dodatečně předpjatých bezprůvlakových deskových konstrukcí v České republice

- **Národní technická knihovna v Praze:** Rozpory 15x15 m, zesílení desek v oblasti sloupů kruhovými hlavicemi o průměru 6 m, čtyř-lánový předpínací systém se soudržností v plochem kanálku, obousměrně předepnuté desky tloušťky 300 mm. Ve sloupových pruzích je deska vyztužena 11 kabely s osovou vzdáleností 400 mm, deskové pruhy jsou vyztuženy kabely s osovou vzdáleností 1500 mm. [2]
- **Přírodovědecká fakulta UP Olomouc:** V budově bylo potřeba realizovat strop nad posluchárnami s rozpětím 12 m a střední komunikační částí s kruhovým prostupem pro centrální schodiště. Předpínání v jednom hlavním směru s pomocným částečným předpětím ve směru druhém. Použití aktivních i pasivních kotev, tloušťka desky 320 mm, beton C30/37-XC1, čtyř-lánový předpínací systém se soudržností v plochem kanálku. Vzdálenost kabelů 600 a 700 mm. [3]

3. Krycí vrstva výztuže, materiálové charakteristiky a parametry předpětí

3.1 Stanovení krycí vrstvy betonářské výztuže:

Konstrukce budovy bude vystavena vlivu prostředí XC1 (beton uvnitř budov s nízkou vlhkostí vzduchu). Vycházíme z třídy konstrukce S4, kterou zvětšíme o 2 stupně z důvodu návrhové životnosti 100 let a následně o 2 stupně snížíme, protože jde o deskovou konstrukci vyrobenou s betonem pevnostní třídy $C40/50 \geq C30/37$. Návrhový přírůstek Δc_{dev} bude minimálně 5 mm, aby byla zachována maximální výška pro předpínací kabely. Deska bude vyztužena betonářskou výztuží o průměru 12 mm.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad \text{vztah (1)}$$

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm}) = \max(12; 15; 10) = 15 \text{ mm} \quad \text{vztah (2)}$$

$$c_{nom} = 15 + 5 = 20 \text{ mm}$$

3.2 Ověření krycí vrstvy předpínací výztuže:

Jde jen o ověření, protože krytí předpínací výztuže vyplývá z krytí betonářské výztuže a průměru betonářských prutů. Kabely budou ležet na dvou vzájemně kolmých vrstvách betonářské výztuže průměru 12 mm. Krytí kabelů tedy vychází $20+12+12 = 44$ mm. Ověříme, zda je tato hodnota v souladu s normou [4]. Hodnota $c_{min,b}$ je pro pravoúhelníkové kanálky určena jako větší z hodnot: menší rozměr nebo polovina většího rozměru. Rozměry kanálku jsou 75x21 mm. $c_{min,b} = \max(21; 75/2) = 38$ mm. Mění se také minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí, $c_{min,dur} = 25$ mm.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad \text{vztah (1)}$$

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm}) = \max(38; 25; 10) = 38 \text{ mm} \quad \text{vztah (2)}$$

$$c_{nom} = 38 + 5 = 43 \text{ mm} \leq 44 \text{ mm}$$

Hodnota krytí vypočtená podle normy [4] zhruba odpovídá požadavku na krytí ve obecném katalogu VSL, kde je minimální krytí stanoveno jako poloviční průměr kanálku $D/2$, minimálně však 40 mm. V evropském technickém schválení ETA pro systém VSLab S [5] použitý v této práci, se o krycí vrstvě hovoří pouze v souvislosti s krytím kotvy.

3.3 Použité materiály a vstupní data výpočtu

Beton C40/50

- modul pružnosti $E_{cm} = 35\,000$ MPa

- třída prostředí XC1 – beton uvnitř budov s nízkou vlhkostí vzduchu.
- rychle tuhnoucí cement R

Předpínací výztuž Y1770S7-15.7

- charakteristická hodnota pevnosti v tahu $f_{pk} = 1770$ MPa
- smluvní mez kluzu 0,1% $f_{p0,1k} = 1560$ MPa
- modul pružnosti $E = 195\,000$ MPa
- 7 drátů v laně, plocha lana $A = 150$ mm²
- třída relaxace 2, lano s nízkou relaxací

Stanovení maximální napínací síly:

$$\sigma_{p,max} = \min\{k_1 \cdot f_{pk}; k_2 \cdot f_{p0,1k}\} \quad \text{vztah (3)}$$

$$\sigma_{p,max} = \min\{0,8 \cdot 1770; 0,9 \cdot 1560\} = \min\{1416; 1404\} = 1404 \text{ MPa}$$

Stanovení maximálního napětí bezprostředně po napnutí:

$$\sigma_{pm0}(x) = \min\{k_7 \cdot f_{pk}; k_8 \cdot f_{p0,1k}\} \quad \text{vztah (4)}$$

$$\sigma_{pm0} = \min\{0,75 \cdot 1770; 0,85 \cdot 1560\} = \min\{1327,5; 1326\} = 1326 \text{ MPa}$$

Stanovení přesné objemové hmotnosti předpjatého betonu

Objemová hmotnost obyčejného betonu se uvažuje 24 kN/m³, pro běžné procentu vyztužení a pro předpínací výztuž se má dále tato hodnota zvětšit o 1 kN/m³ [6]. Bylo přikročeno k přesnému výpočtu objemové tíhy na dílci 1x1x0,3m. Uvažovala se betonářská výztuž Ø12/100 ve čtyřech vrstvách, a dále předpínací výztuž po 0,5 m v obou směrech. Na 1 m předpínací výztuže včetně kanálku se uvažovalo 7 kg. Z objemu betonu byl odečítán objem výztuže. Výsledkem je objemová hmotnost $\gamma_c = 25,5$ kg/m³, která je použita ve výpočtu. Většina konstrukce však bude vyztužena méně a tato hodnota je tedy na straně bezpečné.

Vstupní data výpočtu

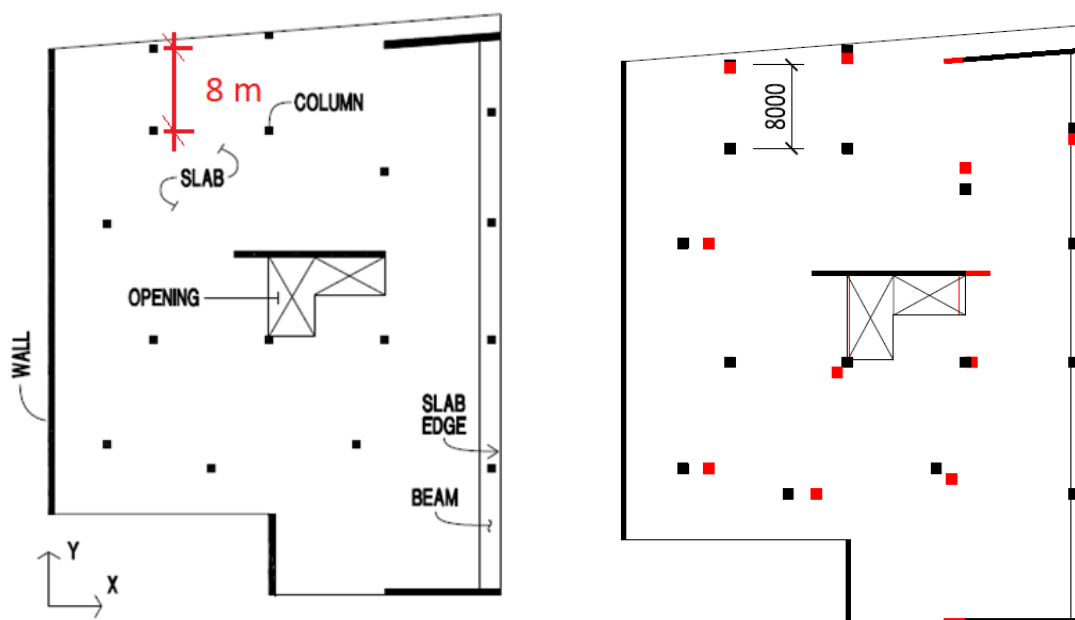
Konstrukce se bude předpínat v době dosažení minimálně 80% pevnosti betonu v tlaku, tedy při minimální pevnosti $f_{ck} = 0,8 \cdot 40 = 32$ MPa. Beton získá 80% pevnost v 7,7 dnech, předpínat se bude v 8 dnech. Tento čas byl zjištěn pomocí programu IDEA, lze jej také stanovit vzorcem v normě [4]. Pevnost betonu při předpínání 32 MPa je dostatečná s ohledem na požadavek Evropského technického schválení ETA pro použitý předpínací systém VSLab S [5], který požaduje při předpínání průměrnou hodnotu pevnosti betonu v tlaku $f_{cm0} \geq 20/25$ MPa.

Byla uvažována relativní vlhkost $RH = 65\%$. Tato hodnota je průměrem normových hodnot pro vnitřní prostředí ($RH = 50\%$) a vnější prostředí ($RH = 80\%$). Konzervativní hodnota by byla hodnota pro vnitřní prostředí, protože nižší relativní vlhkost zvyšuje součinitel dotvarování. Konstrukce však bude několik prvních měsíců své životnosti neopláštěná, a právě v nejbližší době po vybetonování je intenzita dotvarování největší.

4. Konstrukční řešení

Na základě poskytnutého schématu byl vytvořen půdorys desky na nepravidelně rozmístěných podporách. Tuto desku a podpory tvořené sloupy a stěnami můžeme chápat jako typické patro železobetonového skeletu. Schéma bylo třeba rozkreslit v takové velikosti, aby výsledná konstrukce vyžadovala použití předpjatého betonu. V levém horním rohu schématu byla stanovena osová vzdálenost dvou sloupů 8 metrů, viz obrázek 4.1. Tím bylo stanoveno měřítko, z kterého se odvíjely další rozměry. Součástí desky je také otvor pro schodiště ve střední části a průvlak na pravé straně.

V pozdější fázi práce, během návrhu sloupových pruhů pro předpínací kabely, bylo zjištěno, že sloupy jsou umístěny tak nepravidelně, že neumožňují vedení sloupových pruhů v rozumných mezích. Proto bylo přistoupeno k úpravě půdorysu. Sloupy byly rozmístěny více pravidelně, některé stěny bylo prodlouženo a otvor pro schodiště byl zmenšen.



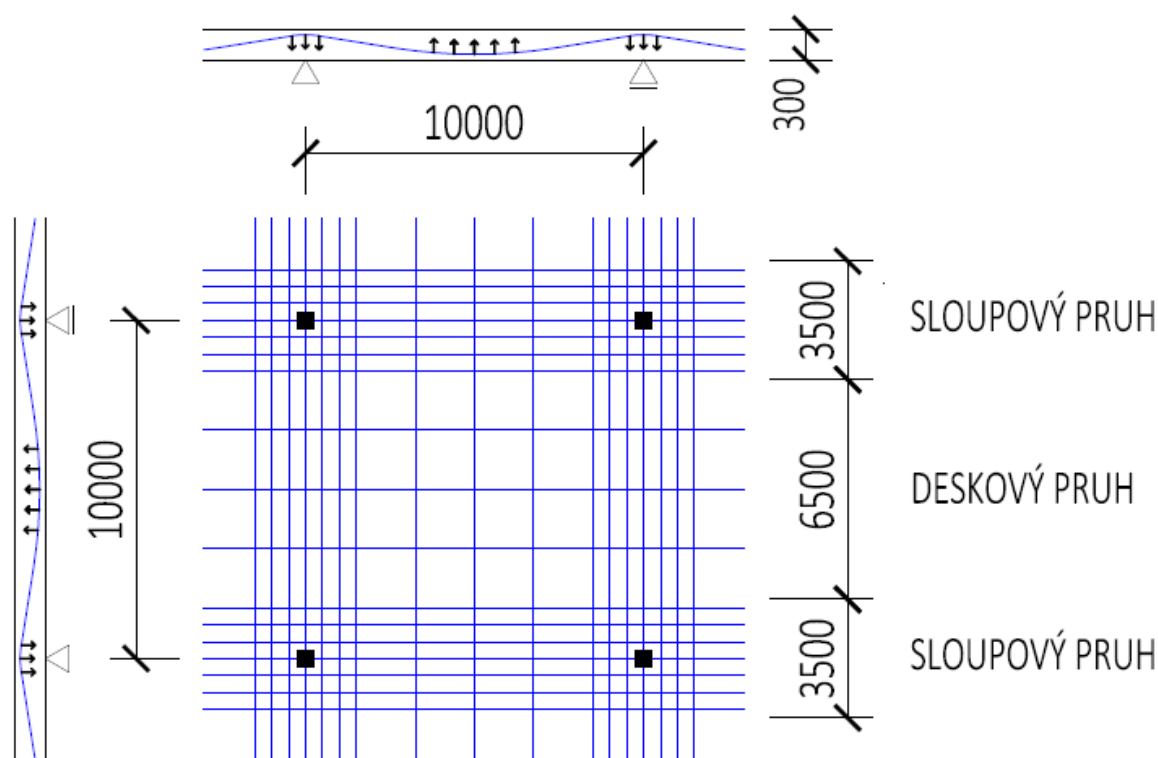
Obrázek 4.1 – původní a upravený půdorys

Deska má tloušťku 300 mm s ohledem na dostatečnou výšku pro vedení předpínacích kabelů. Deska je bezprůvlaková, tj. má stále stejnou tloušťku. Při dolním i horním povrchu desky bude deska v obou směrech vyztužena betonářskou výztuží $\varnothing 12$. Betonářská výztuž u dodatečně předpjatých konstrukcí plní funkci konstrukční – předpínací výztuž se na ni upevňuje a statickou – přispívá ke zvýšení únosnosti a bezpečnosti konstrukce (aby se neporušila křehkým lomem). V podkotevních oblastech betonářská výztuž zabraňuje štěpení betonu. Pro kabely zůstane prostor $h - 2 \cdot c_{\text{nom}} - 4 \cdot \varnothing = 300 - 2 \cdot 20 - 4 \cdot 12 = 212 \text{ mm}$

Sloupy uvnitř desky jsou průřezu 500x500 mm, na krajích desky 500x700 mm s osou větší ohybové tuhosti ve směru většího ohybu. Návrh sloupů a desky na protlačení nebyl předmětem této práce. Dle předběžného výpočtu je smykové napětí působící základním kontrolovaném obvodu 4x vyšší, než únosnost ve smyku při protlačení bez smykové výztuže $v_{\text{Rd,c}}$. S největší pravděpodobností by bylo nutné použít sloupové hlavice.

Stěny jsou tloušťky 250 mm. Stejně jako sloupy nebyly navrhovány, byly pouze použity do modelu konstrukce v programu RFEM.

Předpínací kabely lze uspořádat několika způsoby. V této práci byly kabely uspořádány tak, že sloupový pruh je jimi výrazněji vyztužen a tvoří tak skryté průvlaky. Tyto průvlaky svou šířkou 3,5 m pomáhají redukovat rozpony desek. Šířka sloupového pruhu byla stanovena na základě zkušenosti, neodpovídá tedy šířce sloupového pruhu z metody náhradních rámců v Eurokódu 2 [4]. Ve sloupových pruzích je vždy 7 kabelů umístěných po 0,5 m. Deskových pruzích jsou většinou 3 kabely umístěny v pravidelných rozestupech. Kabely v deskových pruzích se opírají do sloupových pruhů a vynášejí střed desky.



Obrázek 4.2 – definice sloupového a deskového pruhu

5. Zatížení

V následujících dvou podkapitolách budou uvedena stálá a užitná zatížení stropní desky.

5.1 Stálá zatížení

Vlastní tíha:

$$g_{k,sw} = h_s \cdot \gamma_c = 0,3 \cdot 25,5 = 7,65 \text{ kN/m}^2$$

Ostatní stálá zatížení: Patří zde konstrukce těžké plovoucí podlahy a podhled s technologiemi.

$$g_{k,ost} = 2,2 \text{ kN/m}^2 \text{ (viz tabulka 5.1)}$$

Tabulka 5.1 – Ostatní stálá zatížení

Položka	Tloušťka [m]	Vlastní tíha [kN/m ³]	Výpočet	$g_{k,ost}$ [kN/m ²]
Keramická dlažba + tmel	0,02	22	$0,02 \cdot 22$	0,44
Betonová mazanina	0,05	25	$0,05 \cdot 25$	1,25
EPS vrstva	0,05	0,15	$0,05 \cdot 0,15$	0,0075
Podhled a technologie	-	-	-	0,5
Suma				2,2

5.2 Užitná zatížení

Pro potřeby této práce bylo rozhodnuto, že konstrukce bude využita jako kancelářské plochy. Kancelářské plochy jsou v Eurokódu 1 [6] uvedeny jako užitná kategorie B. Charakteristická hodnota plošného zatížení pro tuto kategorii je dle národní přílohy $q_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$.

Lze předpokládat, že stropní deska ponese příčky, které ji budou dělit na menší prostory. Tyto příčky také mohou měnit svou pozici během životnosti konstrukce. Protože použita masivní stropní deska umožňuje příčné roznášení konstrukce, lze vlastní tíhu příček uvažovat jako rovnoměrné zatížení q_k , které připočteme k užitému zatížení. Příčky jsou tvořeny tvárnici Ytong tloušťky 125 mm. Objemová hmotnost Ytongu je 6 kN/m^3 , světlá výška podlaží je 3,5 m. Liniové zatížení od této příčky je $0,125 \cdot 3,5 \cdot 6 = 2,625 \text{ kN/m}$. Pro přemístitelné příčky $2 \text{ kN/m} < \text{vlastní tíha na délku příčky} \leq 3 \text{ kN/m}$ je přídavek k užitému zatížení $q_k = 1,2 \text{ kN/m}^2$. Celková charakteristická hodnota užitého zatížení vstupujícího do kombinací zatížení je tedy $q_k = 2,5 + 1,2 = 3,7 \text{ kN/m}^2$.

5.3 Kombinace zatížení

Budou použity tyto zatěžovací stavy:

- Stálé zatížení - zahrnující vlastní tíhu a ostatní stálé zatížení (při práci v programu IDEA jsou vlastní tíha a ostatní stálé zatížení samostatné zatěžovací stavy z důvodu rozdílného času, kdy začnou působit na konstrukci; v programu RFEM jsou tato zatížení součástí jednoho zatěžovacího stavu)
- Předpětí – obsahující ekvivalentní zatížení od předpětí
- Užité zatížení – zahrnující užité zatížení stanovené pro kategorii B navýšené o ekvivalentní rovnoměrné zatížení od příček

Mezní stav únosnosti

Kombinace pro mezní stav únosnosti pro dočasnou a trvalou návrhovou situaci dle vzorce 6.10 z ČSN EN 1990 [7].

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{vztah (5)}$$

Mezní stav použitelnosti

Charakteristická kombinace:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{vztah (6)}$$

Častá kombinace:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \text{vztah (7)}$$

Kvazistálá kombinace:

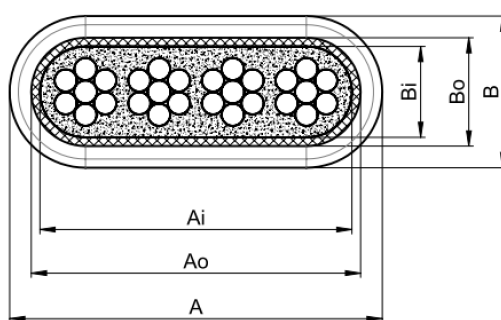
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \text{vztah (8)}$$

Tabulka 5.2 – součinitelé kombinací zatížení

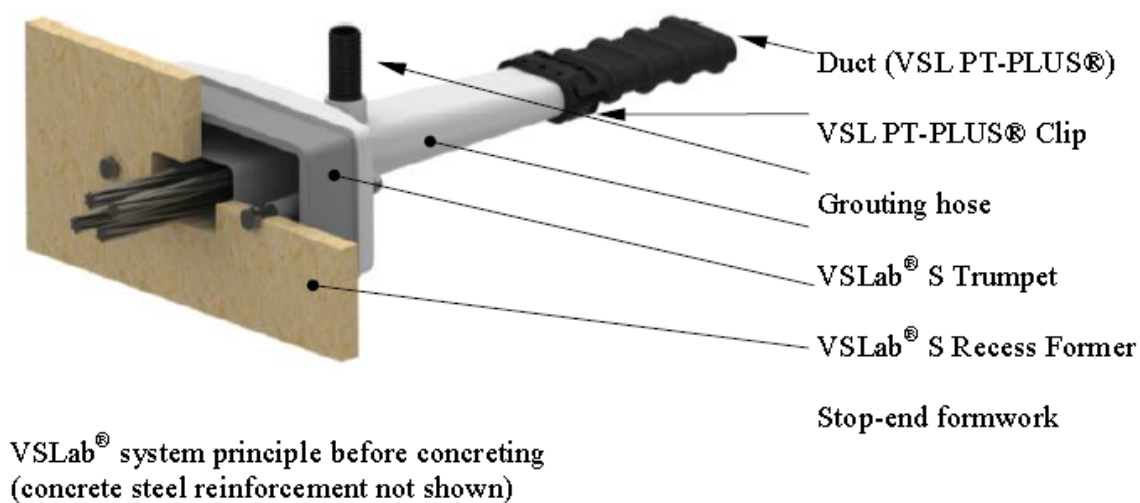
Kombinace	Násobitel	Stálé	Násobitel	Předpětí	Násobitel	Užité
MSÚ	1,35	G _k	1	P	1,5	Q _k
Charakteristická	1	G _k	1	P	1	Q _k
Častá	1	G _k	1	P	0,5	Q _k
Kvazistálá	1	G _k	1	P	0,3	Q _k

6. Předpínací systém VSLab S

Pro předpětí konstrukce bude použit předpínací systém v plochem kanálku se soudržností VSLab S 6-4. Onačení 6-4 znamená, že jde o 4 lanovou variantu tohoto systému. Budou použity 7 – drátová lana o průměru 15,7 mm a průřezovou plochou $A = 150 \text{ mm}^2$ a $s_{f_{pk}} = 1770 \text{ MPa}$. Kabelové kanálky mají plochý průřez dle obrázku $A = 75 \text{ mm}$, $B = 21 \text{ mm}$ a jsou z tenkého plechu s drápkovým spojem. Budou použity aktivní i pasivní kotvy. Aktivní a pasivní kotvy se od sebe technicky neliší.



Obrázek 6.1 – řez kabelovým kanálkem [5]



Obrázek 6.2 – kotevní systém VSLab S [5]

Minimální přímá délka za kotvou:

Kabel by neměl vést zakřiveně v délce trumpet (pouzdra) za kotvící deskou. Délka trumpet za kotvící deskou je v případě čtyřlankové kotvy 320 mm. Při modelování byla použita přímá délka kabelu od okraje dimenzačního dílce 1 m, což je dostatečné i při použití 200 mm hlubokého sklípku pro kotvou.

Minimální poloměry zakřivení kabelu:

V horizontální rovině: $r_{\min} \geq 6,0 \text{ m}$

Ve vertikální rovině: $r_{\min} \geq 2,5 \text{ m}$

Součinitel tření pro dodatečně napínané vnitřní předpínací vložky tvořené lany:

$\mu = 0,19 \text{ rad}^{-1}$ (hodnota z Eurokódu 2 leží v intervalu udávaném výrobcem)

Nezamýšlený úhlový posuv vnitřních předpínacích vložek:

$k = 0,01 \text{ rad/m}$ (interval v Eurokódu 2 se shoduje s intervalem udávaným výrobcem, je vybrána nejméně příznivá hodnota)

Hodnota pokluzu:

6 mm (možný je taky pokluz 5 mm při užití speciálního přípravku při napínání)

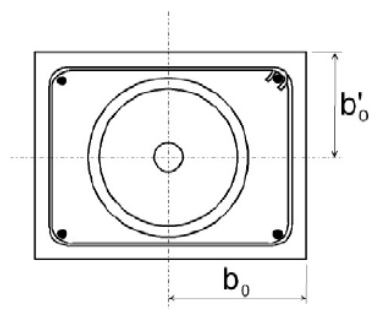
Kotevní napětí:

Veškeré kabely v této práci jsou napínané na $\sigma_{p,\max} = 1400 \text{ MPa}$. Napínání bude probíhat bez korekce napětí.

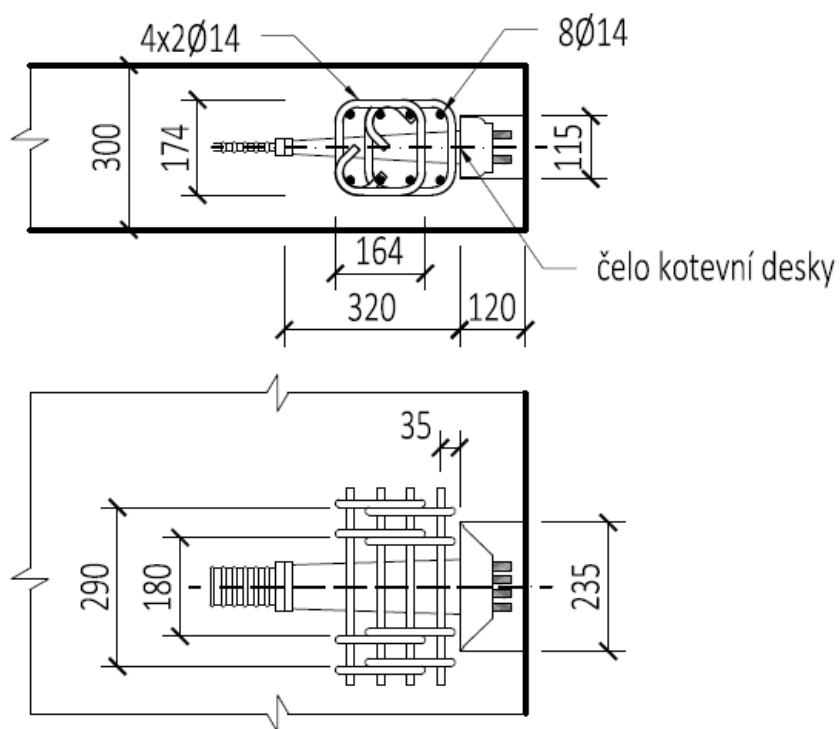
Kotevní oblast:

Nejbližší osová vzdálenost sousedních kotev je 360 mm. V konstrukci jsou ve většině případů kotvy osově vzdálené 500 mm. Nejmenší tloušťka desky pro kotvu je 200 mm.

Kotevní oblast je místem soustředěných tlaků, proto musí být dodrženy určité prostorové a konstrukční podmínky. Musí zde být umístěna výztuž zabraňující praskání a odštěpování betonu. Tato výztuž je definována ve vztahu k myšlenému obdélníkovému hranolu betonu, uvažovaném za každou kotvou. Řez vedený tímto hranolem kolmo k ose kabelu se nazývá Impact Rectangle. Při pohledu na kotvu v ose kabelu musí účinný obdélník (volný překlad Impact Rectangle) předepsaných rozměrů ležet uvnitř betonu. Účinný obdélník má stejný střed a osy symetrie, jako kotevní deska. Účinný obdélník nesmí přesahovat v žádném směru okraj desky. Jeho rozměry jsou definovány jako $X = 2 \cdot b_0$ a $Y = 2 \cdot b'_0$. Pro kabelovou jednotku 6-4 je $X = 360 \text{ mm}$ a $Y = 200 \text{ mm}$.



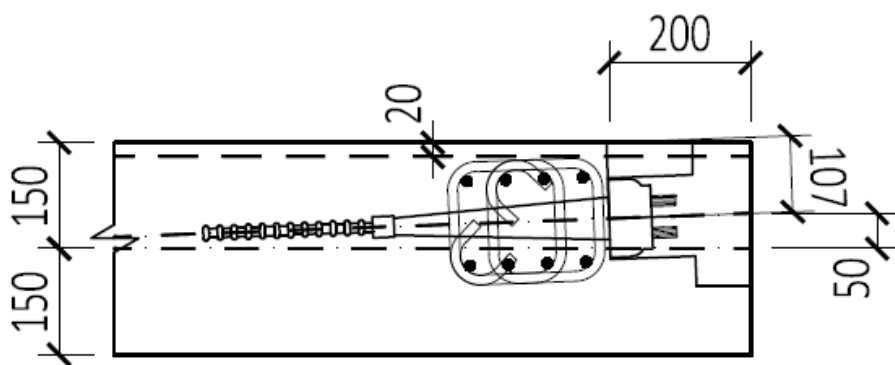
Obrázek 6.3 – definování Impact Rectangle (účinného obdélníku)



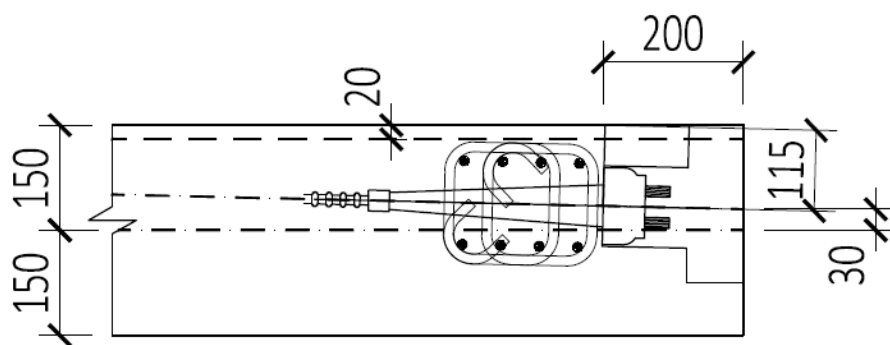
Obrázek 6.4 – rozměry kotvy

Použité řešení kotvení:

Kotvy byly umístěny tak, aby kotevní deska ležela 200 mm od okraje desky. Protože kotva je kryta plastovým límcem o délce 120 mm, leží kotva o 80 mm hlouběji, než by v krajním případě musela. Prvním omezením při umístění kotvy bylo, že účinný obdélník se nesměl „dostat ven“ z betonu. Výška účinného obdélníku je 200 mm, od osy kabelu tedy nesmí být beton blíže než 100 mm. Na obrázku 6.5 je to 107 mm a na obrázku 6.6 115 mm. Druhým omezením byla nutnost dodržet krytí 20 mm u podkotevní výztuže.



Obrázek 6.5 – kotvení podepřeného okraje desky

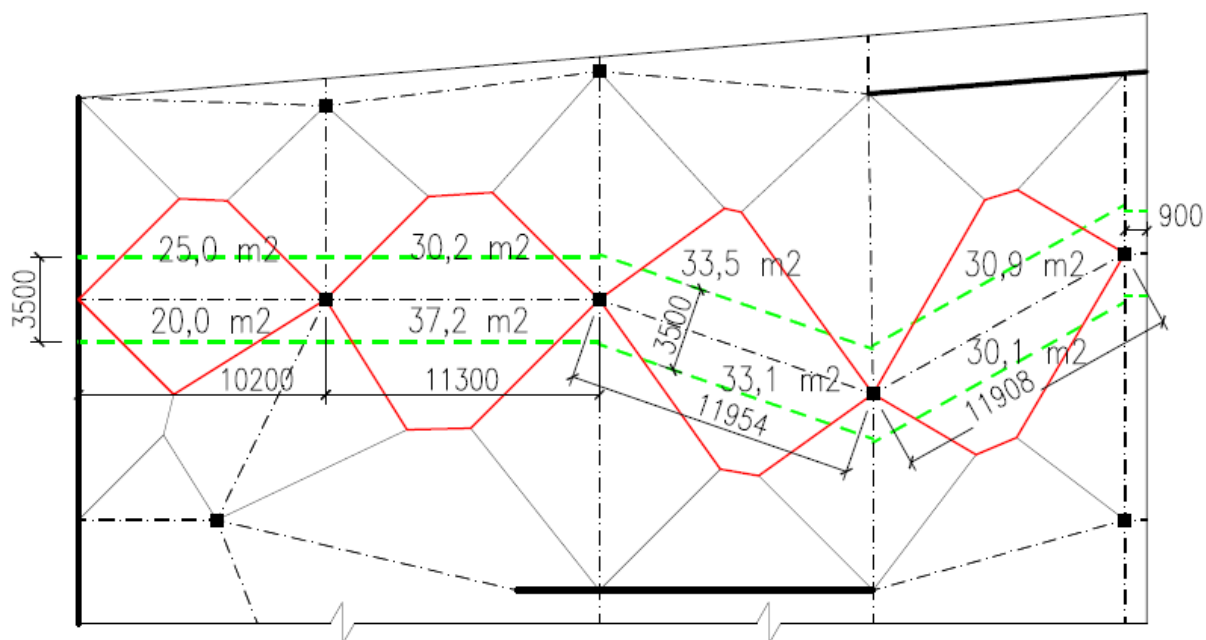


Obrázek 6.6 – kotvení na konzolovitě vyloženém okraji desky

7. Návrh sloupového pruhu

Bylo potřeba určit, kolik kabelů je dostatečných pro předpětí sloupového pruhu. Kdyby se počet kabelů určil odhadem a kabely se hned rozkreslily po celém půdorysu, mohlo by se stát, že jejich počet nebude dostatečný, nebo že jich naopak bude nadbytek. Šířka sloupového pruhu byla stanovena na 3,5 m.

Pro návrh sloupového pruhu byl vybrán druhý vodorovný sloupový pruh shora. Délka jednotlivých polí odpovídá osovým vzdálenostem sloupů. Ač je sloupový pruh zakřivený, byl modelován jako napřímený, ztráty předpětí budou tedy reálně vyšší. Skládal se ze 4 polí: 10,2 + 11,3 + 11,954 + 11,908 m a krátké konzoly 0,9 m. Průřez nosníku, který reprezentuje sloupový pruh, je 3,5x0,3 m. Protože kabely budou vedeny ve vertikálním a horizontálním směru, připadalo na jedno pole pruhu zatížení z jedné čtvrtiny přilehlého deskového pole. Byly rozkresleny zatěžovací plochy přilehlých desek podle pravidla, že úsečka vymezující zatěžovací plochu pólí úhel v rohu desky.

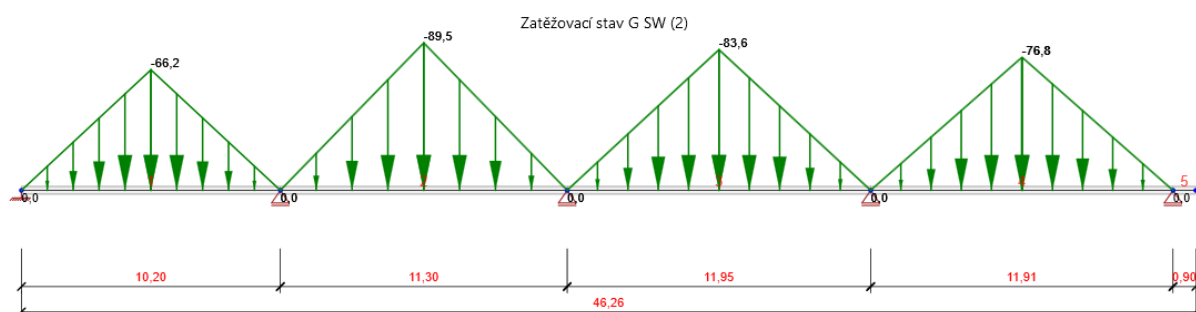


Obrázek 7.1 – zatěžovací plochy sloupového pruhu

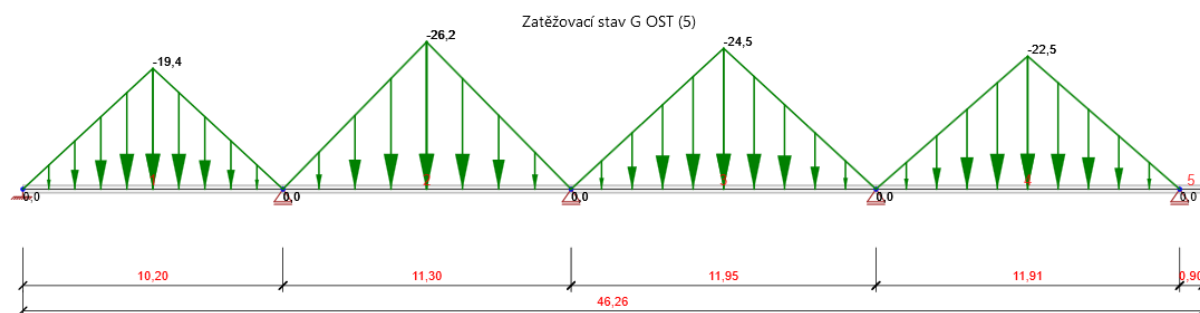
Návrh a posouzení bylo provedeno v programu IDEA. Zatížení bylo zjednodušeně zadáváno jako trojúhelníkové. Byly zadány 3 zatěžovací stavy – dva pro stálé zatížení (zvlášť vlastní tíha a ostatní stálé zatížení – začínají působit v jinou dobu) a užité zatížení. Zatěžovací stav předpětí zatím neobsahuje žádné zatížení. Tabulka 7.1 zobrazuje výpočet hodnot zatížení.

Tabulka 7.1 – Výpočet zatížení sloupového pruhu

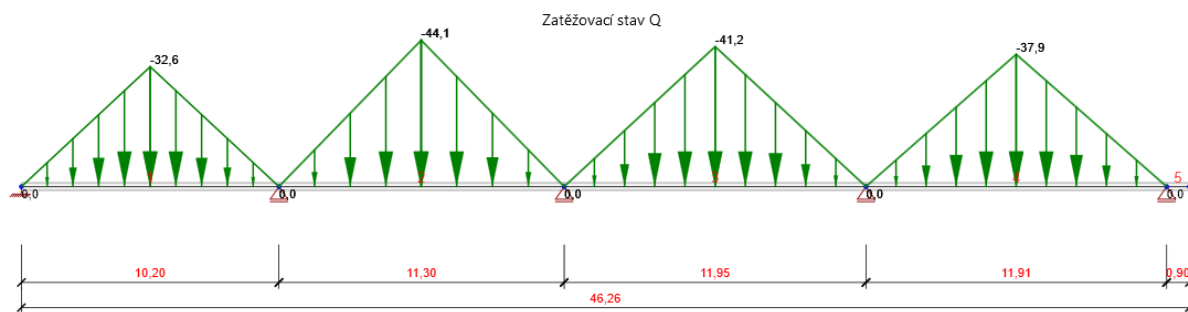
$g_{k, \text{ost}}$	2,2	kN/m ²		
q_k	3,7	kN/m ²		
g_{sw}	7,5	kN/m ²		
Pole	1	2	3	4
A (m ²)	45	67,4	66,6	61
l (m)	10,2	11,3	11,954	11,908
Suma $g_{k, \text{ost}}$ (kN)	99	148,28	146,52	134,2
$g_{k, \text{ost}}$ trojúhelníkové (kN/m)	19,4	26,2	24,5	22,5
Suma q_k (kN)	166,50	249,38	246,42	225,70
q_k trojúhelníkové (kN/m)	32,6	44,1	41,2	37,9
Suma g_{sw} (kN)	337,5	505,5	499,5	457,5
g_{sw} trojúhelníkové (kN/m)	66,2	89,5	83,6	76,8



Obrázek 7.2 – zatěžovací stav vlastní tíha [kN/m]

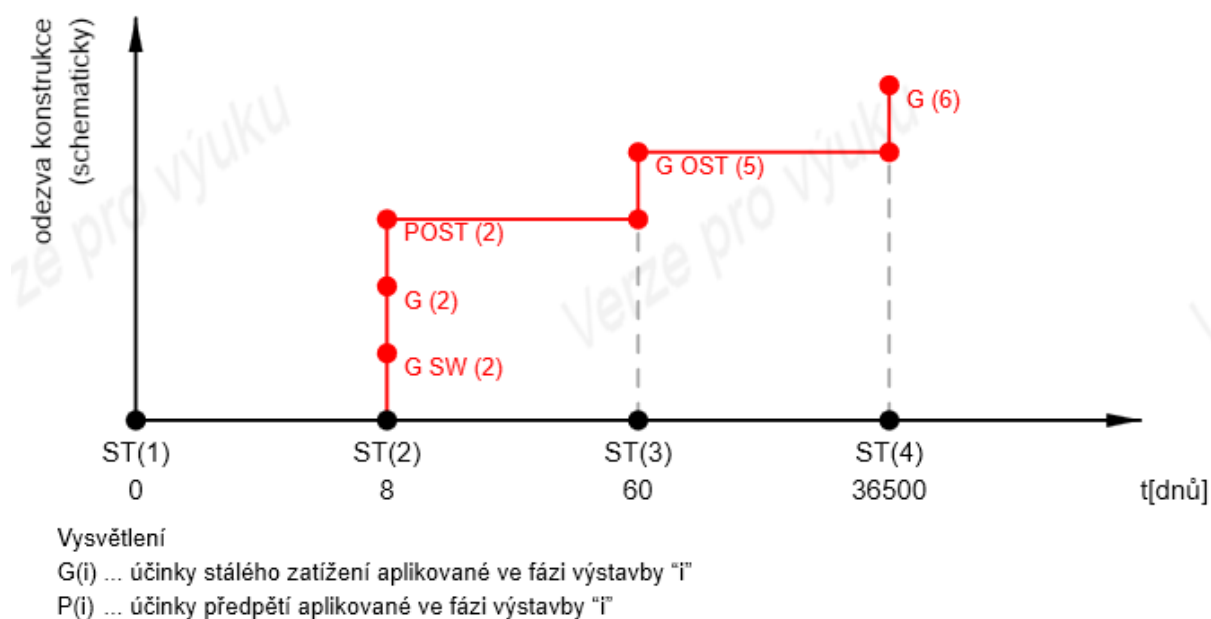


Obrázek 7.3 – zatěžovací stav ostatní stéle zatížení [kN/m]



Obrázek 7.4 – zatěžovací stav užitého zatížení [kN/m]

Po zadání zatížení se pokračuje návrhem kabelů. Nejprve se zobrazí dialog fáze výstavby. Na obrázku 7.5 můžeme vidět počátek působení vlastní tíhy a předpětí v 8 dnech a dále počátek působení ostatního stálého zatížení v 60 dnech. Zatěžovací stavy G(2) a G(6) jsou součástí programu a v tomto případě neobsahují žádné zatížení.



Obrázek 7.5 – fáze výstavby

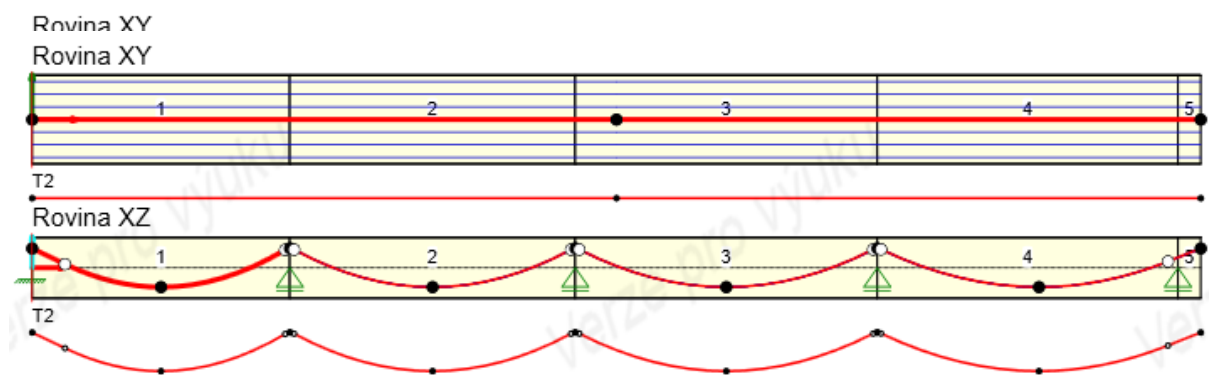
7.1 Předpětí

V tomto návrhu bude sloupový pruh napínán jen z jednoho konce. (V modelu v RFEMu je většina kabelů napínána z obou konců, výjimkou jsou krátké kabely končící v otvoru v desce a v dolní části konstrukce.)

Geometrie:

Vertikální geometrie kabelu je tvořena přímými a parabolickými úseky. Začátek a konec kabelu bude 50 mm nad těžištěm, následuje přímý úsek délky 1 m. Paraboly jsou vedeny tak, aby se osa kabelu přiblížila vždy maximálně 54,5 mm k okraji desky. Tato hodnota vznikla součtem tloušťky krytí 20 mm, dvou vrstev betonářské výztuže á 12 mm a poloviny tloušťky kabelu $21/2 = 10,5$ mm. Ve vrcholech paraboly je dodržen minimální poloměr zakřivení kabelu ve vertikálním směru 2,5 m.

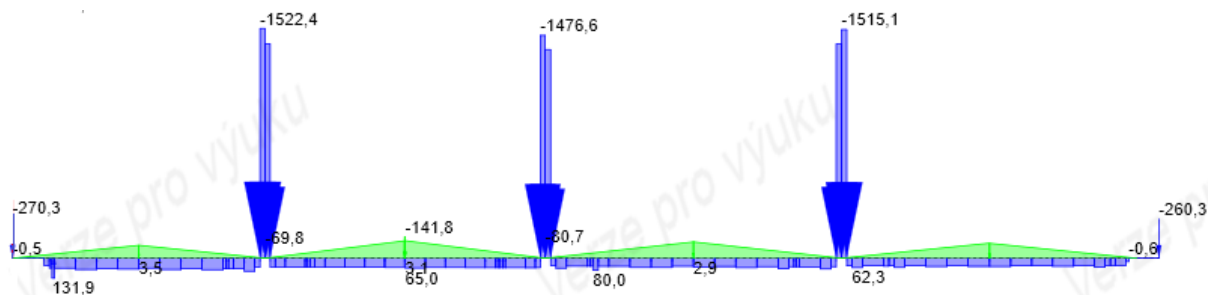
Horizontální geometrie je tvořena přímými úseky sedmi kabelů.



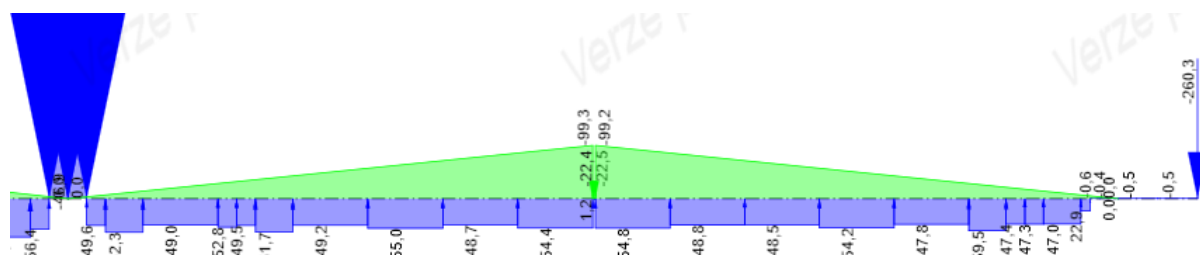
Obrázek 7.6 – geometrie kabelů

Ekvivalentní zatížení a vyrovnání zatížení:

Na obrázku 7.7 můžeme vidět modře znázorněné ekvivalentní zatížení od předpětí a zeleně znázorněné stálé zatížení. Ekvivalentní zatížení od předpětí v poli by svou velikostí mělo vyrovnávat 80-100% stálých zatížení [8]. V jednotlivých polích je postupně vyrovnáno přibližně 165%, 104%, 102% a 100% stálých zatížení. Na obrázku, kde je zvětšeno poslední pole můžeme odhadnout průměrnou hodnotu rovnoměrného ekvivalentního zatížení 50 kN/m a hodnotu 99,3 kN/m trojúhelníkového stálého zatížení. Je tedy vyrovnáno asi 100 % stálých zatížení.



Obrázek 7.7 – ekvivalentní zatížení [kN/m]



Obrázek 7.8 – ekvivalentní zatížení 4. pole [kN/m]

Ztráty předpětí:

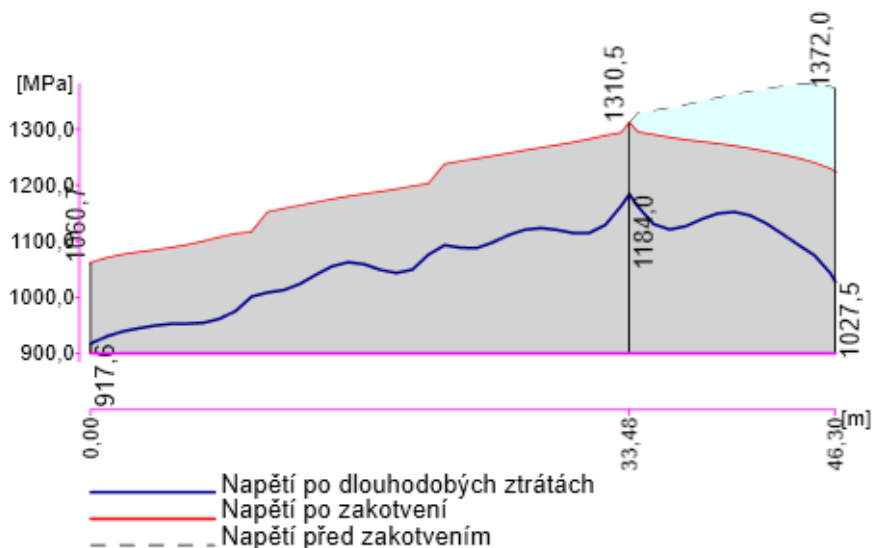
Ztráty předpětí a posudek napětí v kabelu je uveden v tabulce 7.2 pro kabel T2, platí však pro všech sedm kabelů v dimenzačním prvku.

Tabulka 7.2 – ztráty předpětí a posouzení napětí

Název	Materiál	A_p [mm ²]	Délka [m]	L_s [m]	L_{arc} [m]	R_{min} [m]	θ [°]
	Lana	σ_a [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	e_{ba} [mm]	e_{aa} [mm]	L_{set} [m]
T2	Y1770S7-15.7	600	46,30	2,60	43,70	2,50	51,7
	4	1400,0	1079,9	1323,5	295,1	289,1	12,81
Název	$\sigma_{ini,max}$ [MPa]	$\sigma_{p,max}$ [MPa]	Posudek 5.10.2.1(1)P	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_{pm0} [MPa]	Posudek 5.10.3(2)P
T2	1400,0	1404,0	✓	1079,9	1323,5	1326,0	✓

Tabulka 7.3 – vysvětlení ke ztrátám předpětí

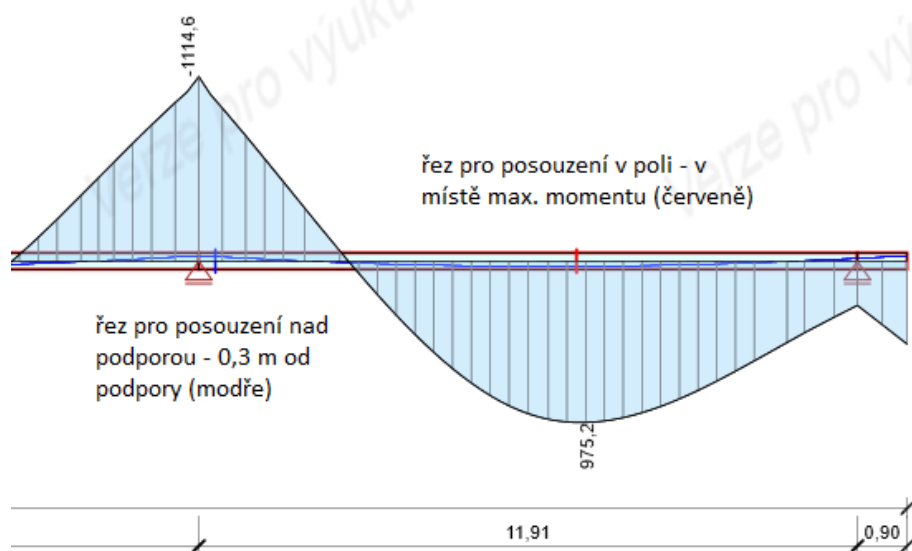
Symbol	Vysvětlení
A_p	Plocha kabelu
Délka	Délka kabelu
L_s	Součet délek přímých částí kabelu
L_{arc}	Součet délek částí kabelu v oblouku
R_{min}	Minimální poloměr křivky nalezený ve vybrané geometrii aktuálního kabelu
θ	Kumulativní úhel ovinutí
σ_a	Napětí při zakotvení
σ_{min}	Minimální napětí podél kabelu po zakotvení
σ_{max}	Maximální napětí podél kabelu po zakotvení
e_{ba}	Teoretické prodloužení kabelu před zakotvením
e_{aa}	Teoretické prodloužení kabelu po zakotvení
L_{set}	Dosah pokluzu
$\sigma_{ini,max}$	Maximální počáteční napětí v kabelu
$\sigma_{p,max}$	Mezní napětí v kabelu podle 5.10.2.1 (1)P
Posudek 5.10.2.1(1)P	Posouzení kritéria podle článku 5.10.2.1 (1)P
σ_{pm0}	Mezní napětí v kabelu podle 5.10.3 (2)
Posudek 5.10.3(2)P	Posouzení kritéria podle článku 5.10.3 (2)P



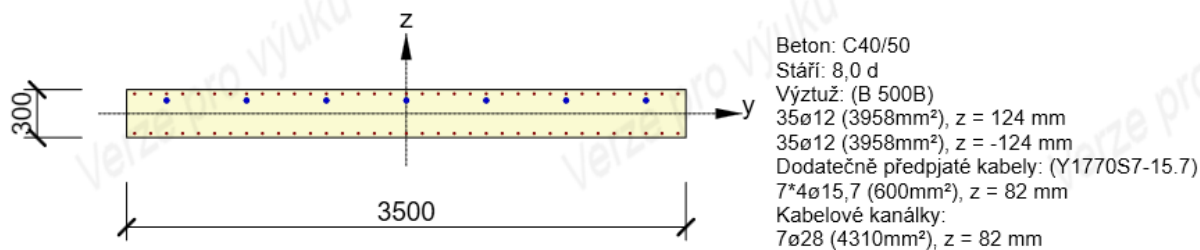
Obrázek 7.9 – ztráty předpětí kabelu T2 [MPa]

7.2 Posouzení nad podporou

Aby bylo možné průřez posoudit, musí obsahovat betonářskou výztuž. K oběma povrchům byla přidána výztuž $\varnothing 12/100$. Posuzoval se průřez 0,3 m vzdálený od podpory. Budou uvedeny posudky v době 8 dní při aplikaci předpětí, dále v době 60 dní při aplikaci ostatního stálého zatížení (posudek uveden podrobně v příloze 1) a na konci návrhové životnosti při 36500 dnech. Ve všech posudcích je rozhodující omezení napětí. Jde o omezení napětí v kabelu, nikoli v betonu. V tomto ohledu jde o „nezajímavý“ posudek, protože toto napětí bylo v kabelu vyvozeno záměrně. Samozřejmě působení zatížení napětí v kabelu mírně zvýší.



Obrázek 7.10 – průběh ohybového momentu pro MSÚ pro čas 60 dní [kNm]



Obrázek 7.11 – vyztužený průřez sloupového pruhu

Tabulka 7.4 – posudky pro čas 8 dní

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	$M_{Ed,y}$ [kNm]	$M_{Ed,z}$ [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-5430,1	-7,7	0,0			97,5	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	$M_{Ed,y}$ [kNm]	$M_{Ed,z}$ [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-2,0	-682,3	0,0			44,0	OK
Smyk	-5430,1			57,1	0,0	5,2	OK
Interakce	-5430,1	-236,3	0,0	57,1	0,0	88,8	OK
Omezení napětí	-5430,1	-7,7	0,0			97,5	OK
Šířka trhliny	-4887,1	-72,3	0,0			0,0	OK

Tabulka 7.5 – posudky pro čas 60 dní (podrobně v příloze 1)

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	$M_{Ed,y}$ [kNm]	$M_{Ed,z}$ [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-5244,7	-544,2	0,0			97,1	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	$M_{Ed,y}$ [kNm]	$M_{Ed,z}$ [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-2,0	-1431,9	0,0			89,4	OK
Smyk	-5244,7			398,4	0,0	28,8	OK
Interakce	-5244,7	-1001,2	0,0	398,4	0,0	89,9	OK
Omezení napětí	-5244,7	-544,2	0,0			97,1	OK
Šířka trhliny	-4720,2	-445,2	0,0			5,8	OK

Tabulka 7.6 – posudky pro konec návrhové životnosti

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-4866,2	-589,1	0,0			91,5	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-1,8	-1445,8	0,0			90,4	OK
Smyk	-4866,2			421,6	0,0	32,2	OK
Interakce	-4866,2	-1046,1	0,0	421,6	0,0	89,7	OK
Omezení napětí	-4866,2	-589,1	0,0			91,5	OK
Šířka trhliny	-4379,6	-485,6	0,0			11,5	OK

7.3 Posouzení v poli

Vyztužení betonářskou výztuží stejné je jako v průřezu nad podporou.

Tabulka 7.7 – posudky pro čas 8 dní

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-5325,8	141,0	0,0			95,5	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-1,5	841,2	0,0			51,8	OK
Smyk	-5325,8			6,7	0,0	0,6	OK
Interakce	-5325,8	337,4	0,0	6,7	0,0	86,5	OK
Omezení napětí	-5325,8	141,0	0,0			95,5	OK
Šířka trhliny	-4793,2	183,0	0,0			0,0	OK

Tabulka 7.8 – posudky pro čas 60 dní

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-5181,4	596,0	0,0			96,9	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-1,5	1479,6	0,0			88,3	OK
Smyk	-5181,4			6,3	0,0	0,5	OK
Interakce	-5181,4	989,5	0,0	6,3	0,0	89,8	OK
Omezení napětí	-5181,4	596,0	0,0			96,9	OK
Šířka trhliny	-4663,2	497,7	0,0			10,3	OK

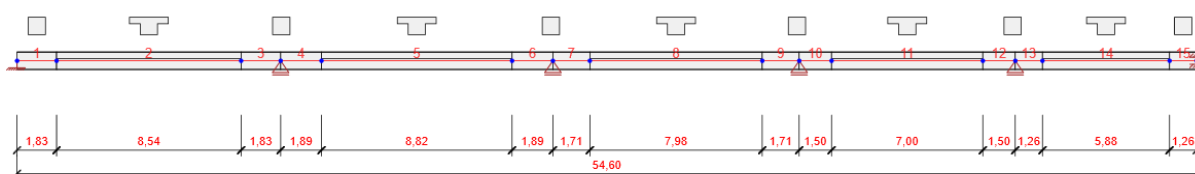
Tabulka 7.9 – posudky pro konec návrhové životnosti

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-4843,8	622,6	0,0			91,9	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-1,4	1474,3	0,0			88,1	OK
Smyk	-4843,8			5,9	0,0	0,4	OK
Interakce	-4843,8	1016,1	0,0	5,9	0,0	89,6	OK
Omezení napětí	-4843,8	622,6	0,0			91,9	OK
Šířka trhliny	-4359,4	521,7	0,0			15,4	OK

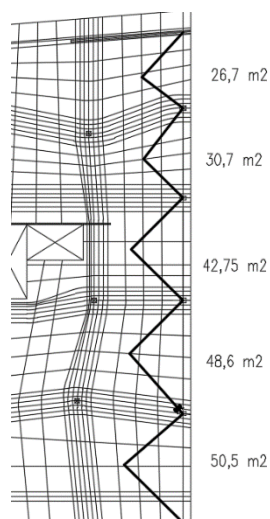
8. Návrh průvlastku

Už ve výchozím schématu se na pravé straně konstrukce počítalo s průvlastkem. Prvotní myšlenkou bylo udělat plochý průvlastek s jedním kabelem, který by měl šířku sloupů 0,7 m a z desky by jako žebro vystupoval 0,3 m. Celkové rozměry by tak byly $b = 0,7$ m, $h = 0,6$ m.

Zatížení stálé a užité bylo stanoveno podobně jako u sloupového pruhu, s tím rozdílem, že zatěžovací trojúhelníkové plochy byly tentokrát jen na jedné straně průvlastku. Na obrázcích zatěžovacích stavů z programu IDEA vypadá průběh trojúhelníkového zatížení zalomeně, jde pouze o vlastnost zobrazení. Navíc však byl průvlastek zatížen svislými reakcemi od kotvení kabelů. Reakce od kotvení kabelů byly odečteny zvlášť pro každý kabel z modulu RF-Tendon programu RFEM. Požadavkem bylo opět vyrovnaní 100% stálých zatížení (mezi nimi i reakcemi od kotvení), což se ukázalo při výše uvedených dimenzích a při použití jednoho kabelu, jak nereálné. Byla zvětšena výška průvlastku na $h = 0,8$ m. Aby bylo možné na koncích průvlastku zakotvit dva kabely, byla šířka zvětšena na $b = 0,8$ m. Osová vzdálenost kabelů je 360 mm, což odpovídá minimální osově vzdálenosti kotev. V polích průvlastku se počítá se spolupůsobící šířkou desky $b_{\text{eff}} = 1,8$ m. Ta je určena na jedné straně okrajem desky, na druhé straně je brána symetricky.



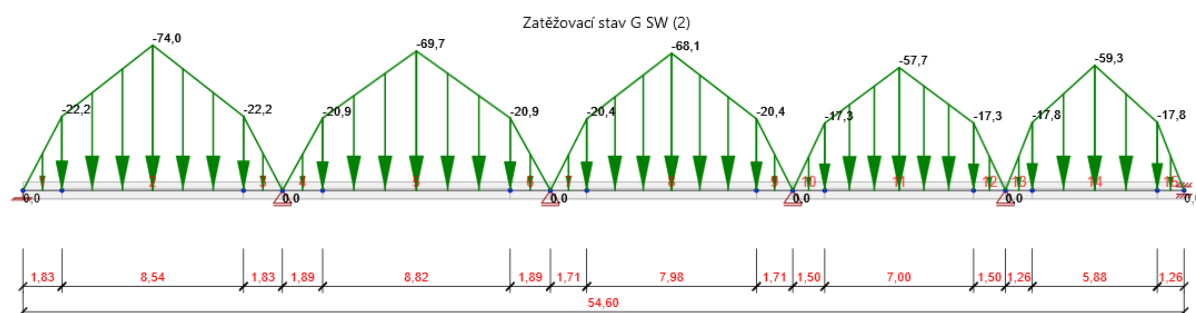
Obrázek 8.1 – průvlastek - spolupůsobící šířka desky



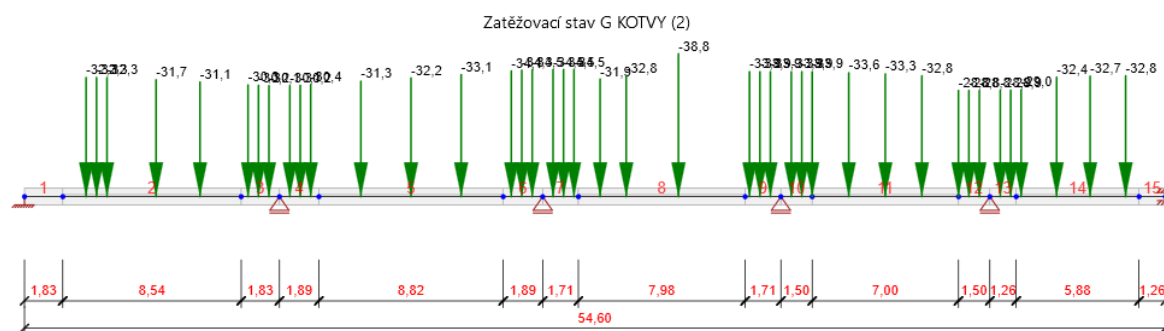
Obrázek 8.2 – zatěžovací plochy průvlastku

Tabulka 8.1 – výpočet zatížení průvlaku

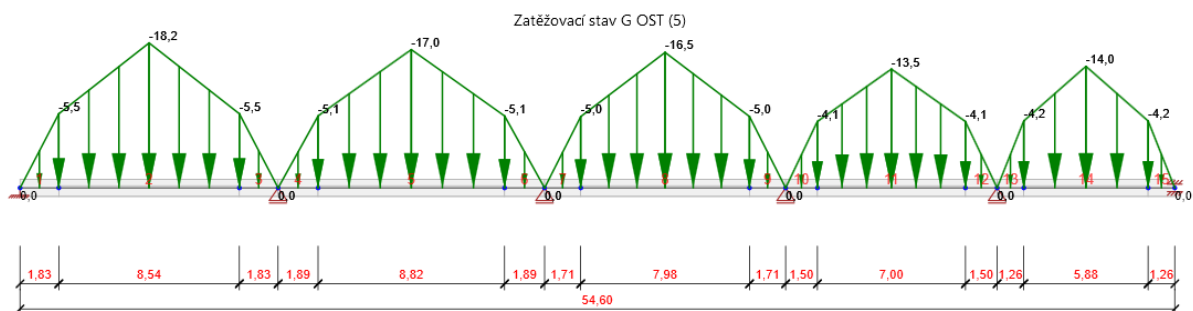
Objem. tíha betonu	25,5	kN/m ³			
g_{sw}	7,65	kN/m ²			
$g_{k, ost}$	2,2	kN/m ²			
q_k	3,7	kN/m ²			
Pole	1	2	3	4	5
l (m)	12,2	12,6	11,4	10	8,4
A (m ²)	50,5	48,6	42,75	30,7	26,7
Vlastní tíha průvlaku (kN)	65,331	67,473	61,047	53,55	44,982
Suma g_{sw} (kN)	451,7	439,3	388,1	288,4	249,2
g_{sw} trojúhelníkové (kN/m)	74,0	69,7	68,1	57,7	59,3
krajní trojúhelníky	22,2	20,9	20,4	17,3	17,8
Suma $g_{k, ost}$ (kN)	111,1	106,9	94,1	67,5	58,7
$g_{k, ost}$ trojúhelníkové (kN/m)	18,2	17,0	16,5	13,5	14,0
krajní trojúhelníky	5,5	5,1	5,0	4,1	4,2
Suma q_k (kN)	186,9	179,8	158,2	113,6	98,8
q_k trojúhelníkové (kN/m)	30,6	28,5	27,8	22,7	23,5
krajní trojúhelníky	9,2	8,6	8,3	6,8	7,1



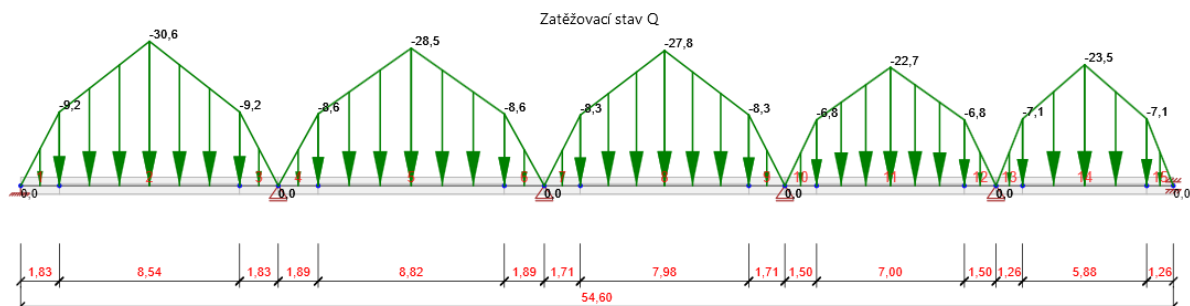
Obrázek 8.3 – zatížení stálé - vlastní tíha průvlaku + stálé zat. betonovou deskou [kN/m]



Obrázek 8.4 – zatížení od kotev předpínacích kabelů [kN]



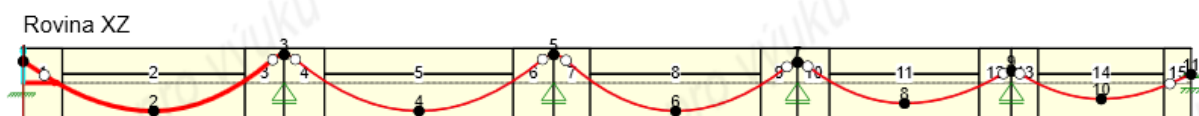
Obrázek 8.5 – ostatní stálé zatížení [kN/m]



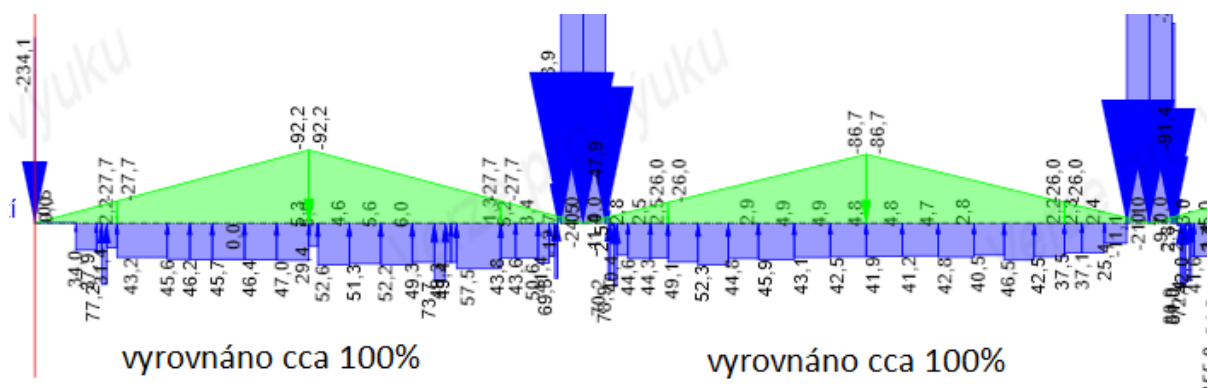
Obrázek 8.6 – užité zatížení [kN/m]

8.1 Předpětí

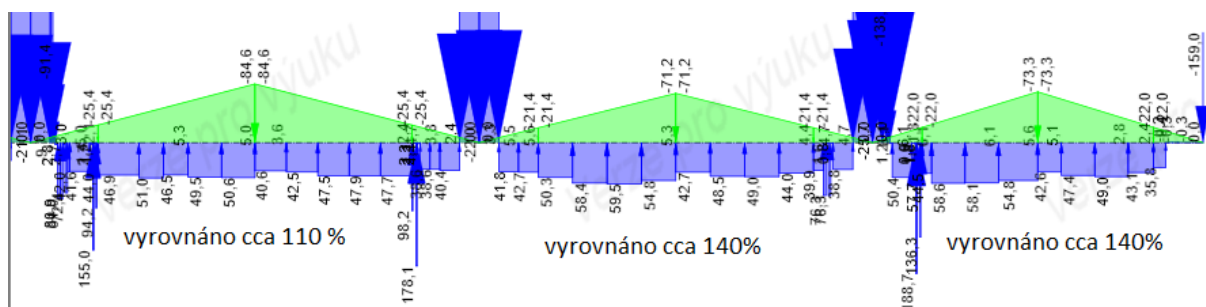
Pro předpětí průvlnaku je použit stejný předpínací systém, jako v případě desky, tedy kabely s plochými kanálky. Průvlnak je napínán z obou stran. Fáze výstavby jsou shodné s těmi u sloupového pruhu. V kratších polích průvlnaku bylo zmenšováno vzepětí kabelu, aby ekvivalentní zatížení nebylo příliš vysoké (např. 200% stálých zatížení). Taky se tím docílilo zmenšení kumulativního úhlu ovinutí a tím i ztrát předpětí, které jsou dost vysoké.



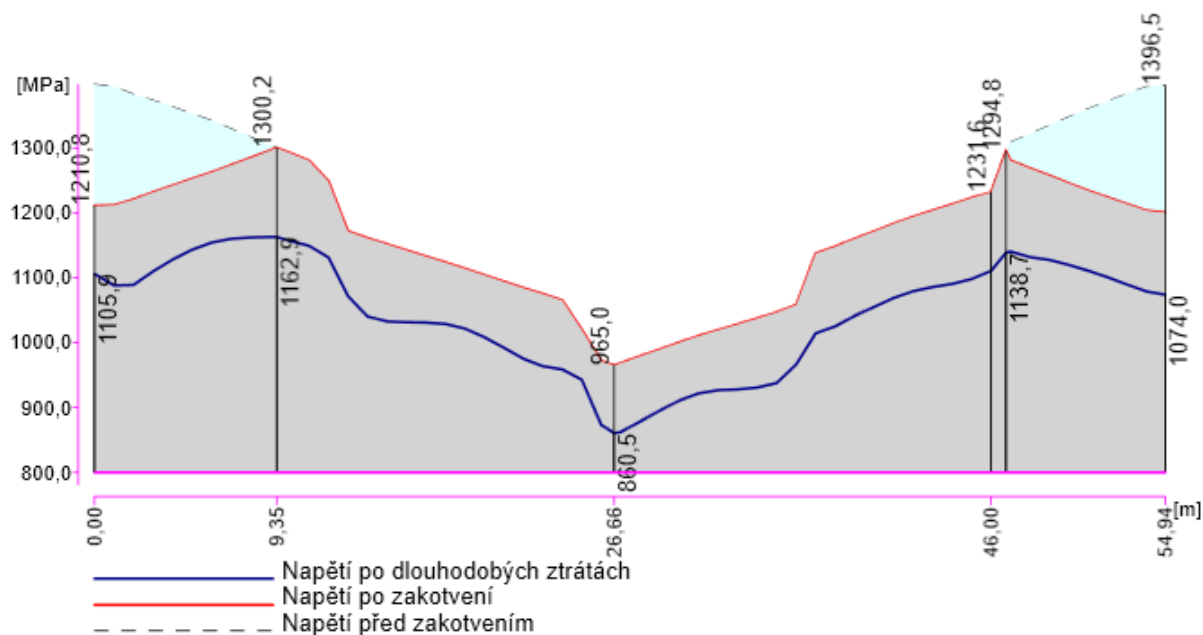
Obrázek 8.7 – vedení kabelů



Obrázek 8.8 – vyrovnání stálých zatížení v polích 1 a 2 [kN/m]



Obrázek 8.9 – vyrovnání stálých zatížení v polích 3,4 a 5 [kN/m]



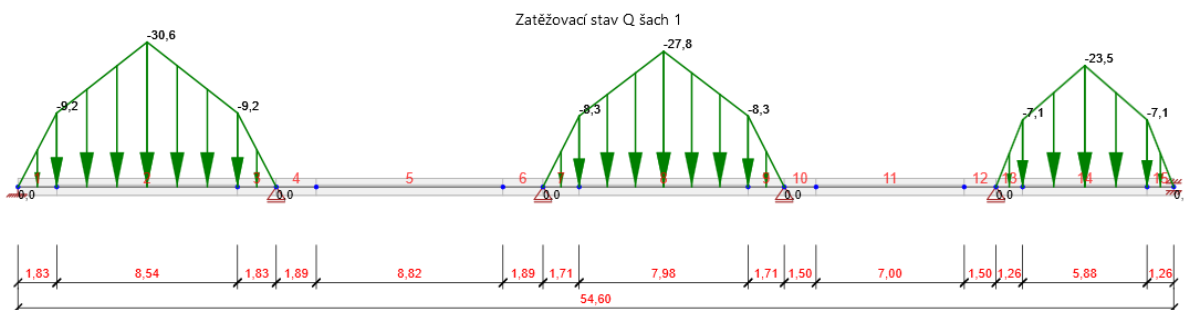
Obrázek 8.10 – ztráty předpětí [MPa]

Tabulka 8.2 – výpočet ztrát předpětí a posouzení napětí

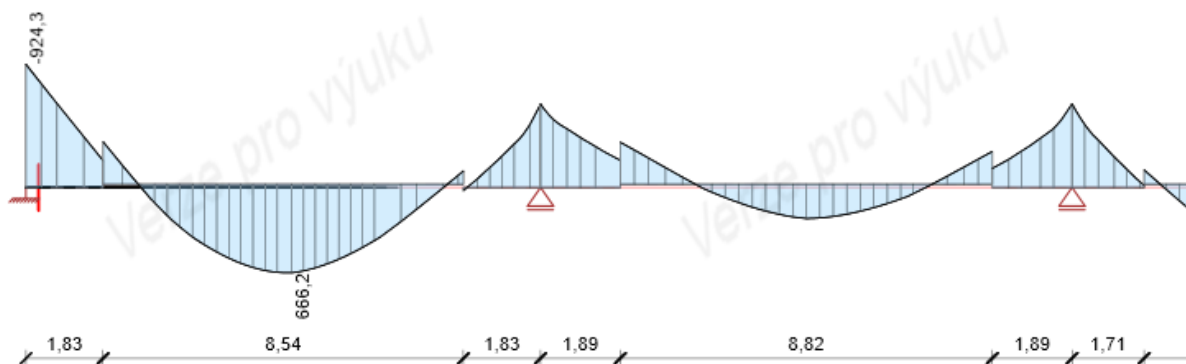
Název	Materiál	A_p [mm ²]	Délka [m]	L_s [m]	L_{arc} [m]	R_{min} [m]	θ [°]
	Lana	σ_a [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	e_{ba} [mm]	e_{aa} [mm]	L_{set} [m]
T4	Y1770S7-15.7	600	54,94	2,00	52,94	2,50	191,3
	4	1400,0	967,7	1302,9	336,7	326,7	9,35
T5	Y1770S7-15.7	600	54,94	2,00	52,94	2,50	191,3
	4	1400,0	967,7	1302,9	336,7	326,7	9,35
Název	$\sigma_{ini,max}$ [MPa]	$\sigma_{p,max}$ [MPa]	Posudek 5.10.2.1(1)P	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_{pm0} [MPa]	Posudek 5.10.3(2)P
T4	1400,0	1404,0	✓	967,7	1302,9	1326,0	✓
T5	1400,0	1404,0	✓	967,7	1302,9	1326,0	✓

8.2 Posouzení nad podporou

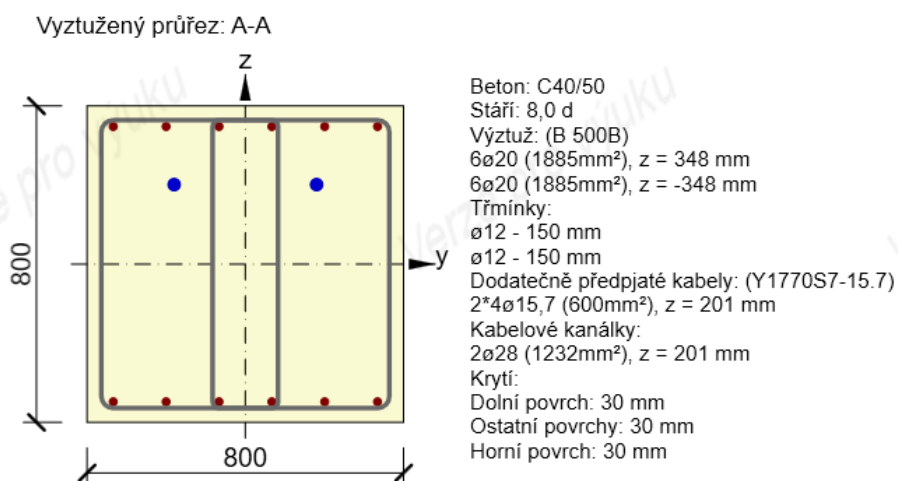
Při stanovení vnitřních sil bylo vzato v potaz rozdělení užitého zatížení do dvou zatěžovacích stavů. Pro posouzení nad podporou je rozhodující kombinace se zatěžovacím stavem Q šach 1. Posuzovaný řez se nacházel 0,3 m od ideální podpory. Průřez byl vyztužen shodně v poli i nad podporou. Vnitřní třmínky jsou umístěny s ohledem na skutečné rozměry kabelového kanálku a taky s ohledem možnosti uchycení na podélnou výztuž.



Obrázek 8.11 – zatížení Q šach 1 [kN/m]



Obrázek 8.12 – moment pro MSÚ, fáze 60 d, řez pro posouzení [kNm]



Obrázek 8.13 – vyztužení průřezu

Tabulka 8.3 – posouzení v 8 dnech

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-1434,3	-116,1	0,0			91,2	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-0,1	-565,0	0,0			37,3	OK
Smyk	-1434,3			161,4	0,0	25,3	OK
Interakce	-1434,3	-276,5	0,0	161,4	0,0	83,3	OK
Omezení napětí	-1434,3	-116,1	0,0			91,2	OK
Šířka trhliny	-1290,9	-170,9	0,0			0,0	OK

Tabulka 8.4 – posouzení v 60 dnech

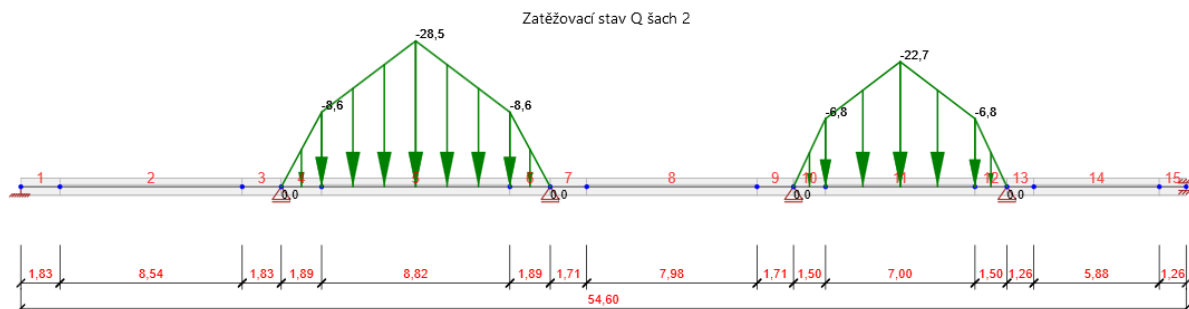
Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-1404,1	-491,0	0,0			92,2	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-0,1	-1098,6	0,0			71,3	OK
Smyk	-1404,1			406,3	0,0	54,7	OK
Interakce	-1404,1	-816,3	0,0	406,3	0,0	89,7	OK
Omezení napětí	-1404,1	-491,0	0,0			92,2	OK
Šířka trhliny	-1263,7	-419,7	0,0			20,0	OK

Tabulka 8.5 – posouzení na konci návrhové životnosti (podrobně v příloze 2)

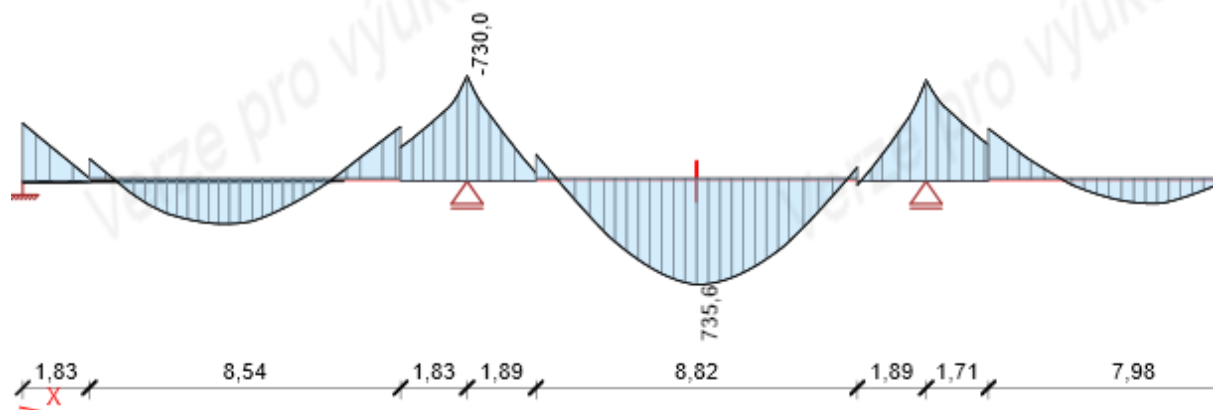
Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Interakce	-1301,2	-855,6	0,0	423,8	0,0	89,5	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-0,1	-1117,3	0,0			72,6	OK
Smyk	-1301,2			423,8	0,0	56,7	OK
Interakce	-1301,2	-855,6	0,0	423,8	0,0	89,5	OK
Omezení napětí	-1301,2	-530,4	0,0			86,9	OK
Šířka trhliny	-1171,1	-455,1	0,0			30,5	OK

8.3 Posouzení v poli

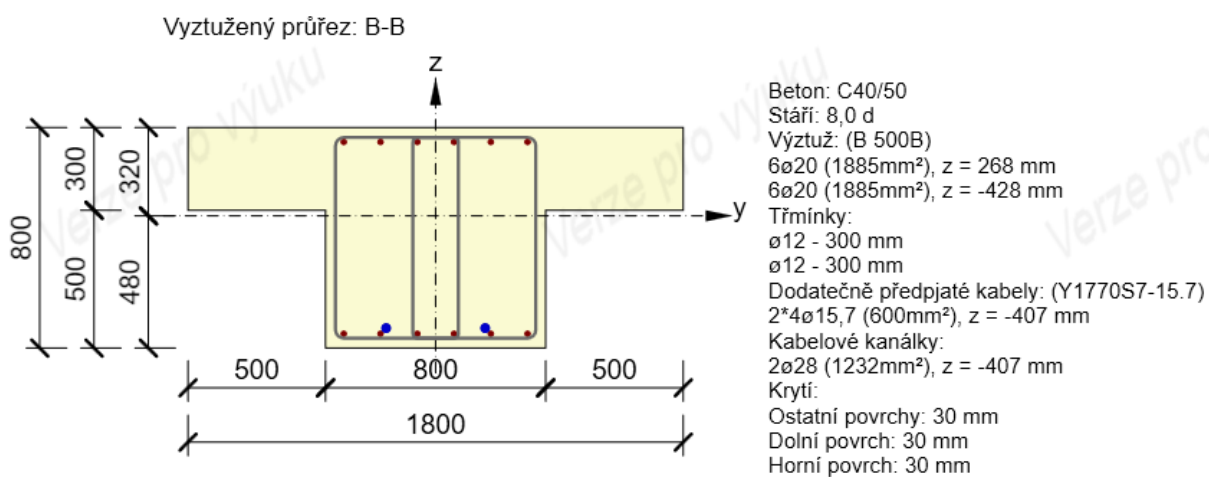
Rozhodující je kombinace se zatěžovacím stavem Q šach 2. Vyztužení je stejné jako v průřezu nad podporou, navíc je zde spolupůsobící šířka desky.



Obrázek 8.14 – zatěžovací stav Q šach 2 [kN/m]



Obrázek 8.15 – moment pro MSÚ v 60 dnech, vyznačení řezu pro posouzení [kNm]



Obrázek 8.16 – řez průvlakem se spolupůsobící šířkou v poli

Tabulka 8.6 – posouzení v 8 dnech

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-1341,4	99,8	0,0			84,2	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-0,2	787,3	0,0			42,6	OK
Smyk	-1341,4			21,3	0,0	5,3	OK
Interakce	-1341,4	241,0	0,0	21,3	0,0	75,2	OK
Omezení napětí	-1341,4	99,8	0,0			84,2	OK
Šířka trhliny	-1207,3	140,7	0,0			0,0	OK

Tabulka 8.7 – posouzení v 60 dnech

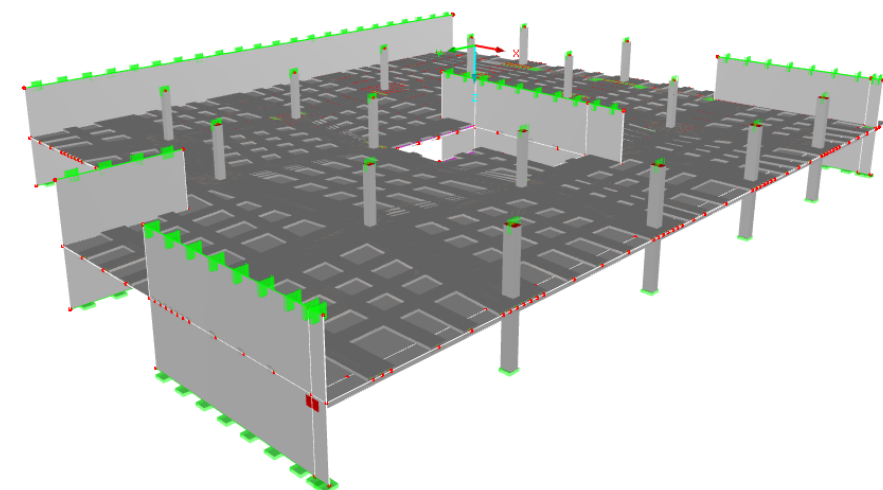
Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Interakce	-1319,4	742,4	0,0	25,0	0,0	85,3	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-0,1	1279,7	0,0			68,8	OK
Smyk	-1319,4			25,0	0,0	5,9	OK
Interakce	-1319,4	742,4	0,0	25,0	0,0	85,3	OK
Omezení napětí	-1319,4	446,1	0,0			83,6	OK
Šířka trhliny	-1187,5	365,6	0,0			0,0	OK

Tabulka 8.8 – posouzení na konci návrhové životnosti

Rozhodující typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Omezení napětí	-1231,3	473,0	0,0			83,2	OK
Typ posudku	N_{Ed} [kN]	M_{Ed,y} [kNm]	M_{Ed,z} [kNm]	V_{Ed} [kN]	T_{Ed} [kNm]	Hodnota [%]	Posudek
Únosnost N-M-M	-0,1	1270,7	0,0			68,3	OK
Smyk	-1231,3			25,0	0,0	6,1	OK
Interakce	-1231,3	769,3	0,0	25,0	0,0	81,6	OK
Omezení napětí	-1231,3	473,0	0,0			83,2	OK
Šířka trhliny	-1108,2	389,8	0,0			22,7	OK

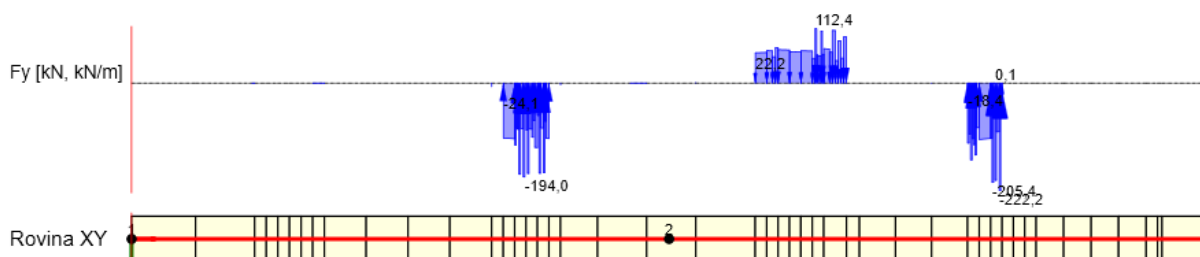
9. Model konstrukce

Půdorys modelu včetně horizontální geometrie kabelů byl vytvořen v programu Autocad. Tento půdorys byl importován do programu RFEM jako linie a na jejich základě byl vytvořen trojrozměrný model. Spodní stěny a sloupy jsou vetknuty, horní posuvně vetknuty. Stropní deska je zadána jako jediná deska s otvorem. Z linií vedoucích v rovině desky byly vytvořeny tzv. výsledkové pruty (průřez 0,5*0,3 m pro sloupový pruh resp. 1,0*0,3 m pro deskový pruh), které jsou nehmotné, ale stávají se nositeli kabelů. V modulu RF-Tendon je možné z nich vytvořit tzv. dimenzační dílec a vertikální geometrii kabelů. Dimenzační dílce se v modulu RF-Tendon zobrazí ve 2D jako rozvinuté. Při návratu z modulu zpět se do zatěžovacího stavu předpětí importuje ekvivalentní zatížení od předpětí.



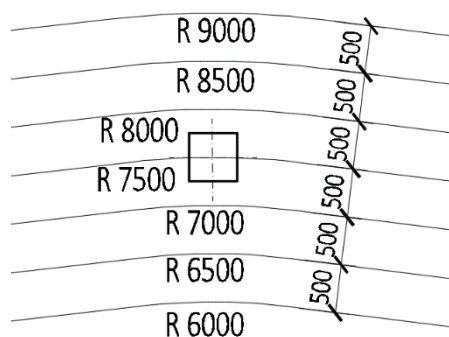
Obrázek 9.1 – model v RFEMu

Kumulativní úhel ovinutí se skládá jak ze zakřivení vertikálního – tj. způsobeném vzepětím kabelů, tak ze zakřivení horizontálního v rovině desky. Příspěvek obou těchto složek k celkovému kumulativnímu úhlu ovinutí může být u zakřivených kabelů přibližně 1:1. Tím narůstají ztráty předpětí. Kabely zakřivené v rovině desky taky vyvozují vodorovné síly.



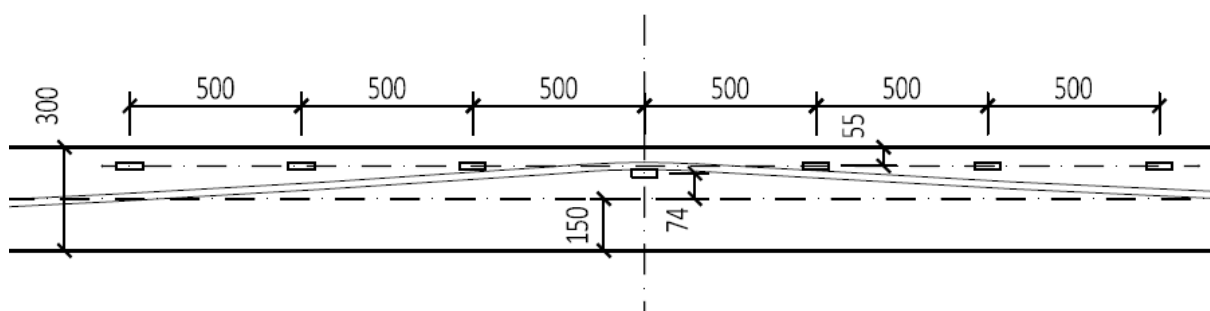
Obrázek 9.2 – síly vyvozené předpětím v rovině desky [kN/m]

Nejmenší poloměr zakřivení kabelu v rovině desky je 6 m. Tento poloměr dodržuje kružnice na vnitřní straně zakřivení sloupového pruhu. Poloměry dalších kružnic narůstají po 0,5 m tak, aby byla mezi kabely stále stejná vzdálenost.

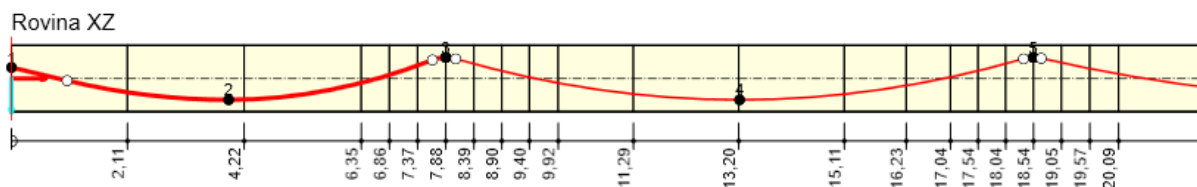


Obrázek 9.3 – poloměry zakřivení kabelů

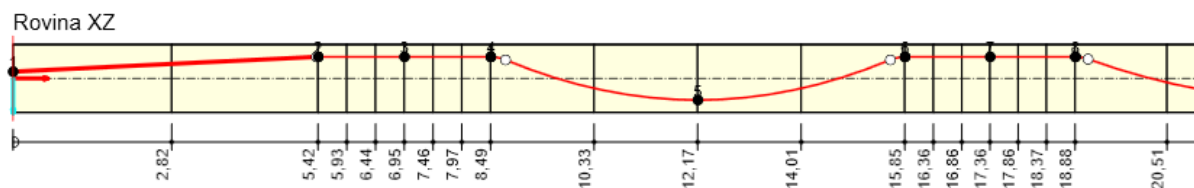
Na obrázku 9.4 můžeme vidět schéma křížení kabelů nad sloupem. Kabel jdoucí v rovině obrázku a zbylých 6 kabelů s ním rovnoběžných, mají klasický, nekomplikovaný průběh. Kabely jdoucí kolmo k rovině obrázku se po celou dobu křížení (tj. 3 m) drží při horním povrchu, pak teprve začínají klesat. Výjimkou je prostřední kabel, který je na obrázku zobrazen ve své maximální výšce, na obě strany od tohoto řezu už bude jenom klesat. Tento kabel jako jediný z křížení nedosáhne standardní vzdálenost od horního povrchu 54,5 mm.



Obrázek 9.4 – křížení kabelů

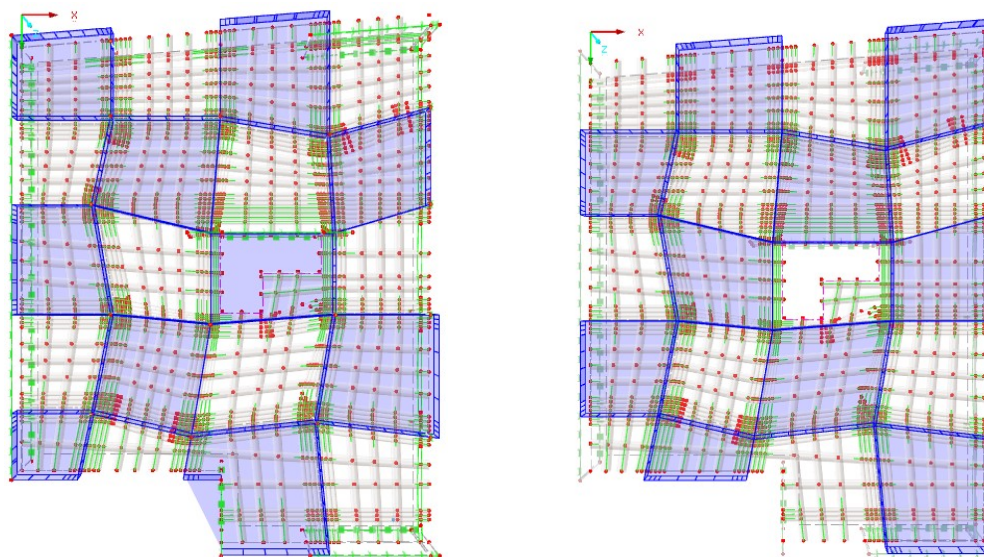


Obrázek 9.5 – vedení kabelů v rovině obrázku 9.4



Obrázek 9.6 – vedení kabelů kolmo na rovinu obrázku 9.4

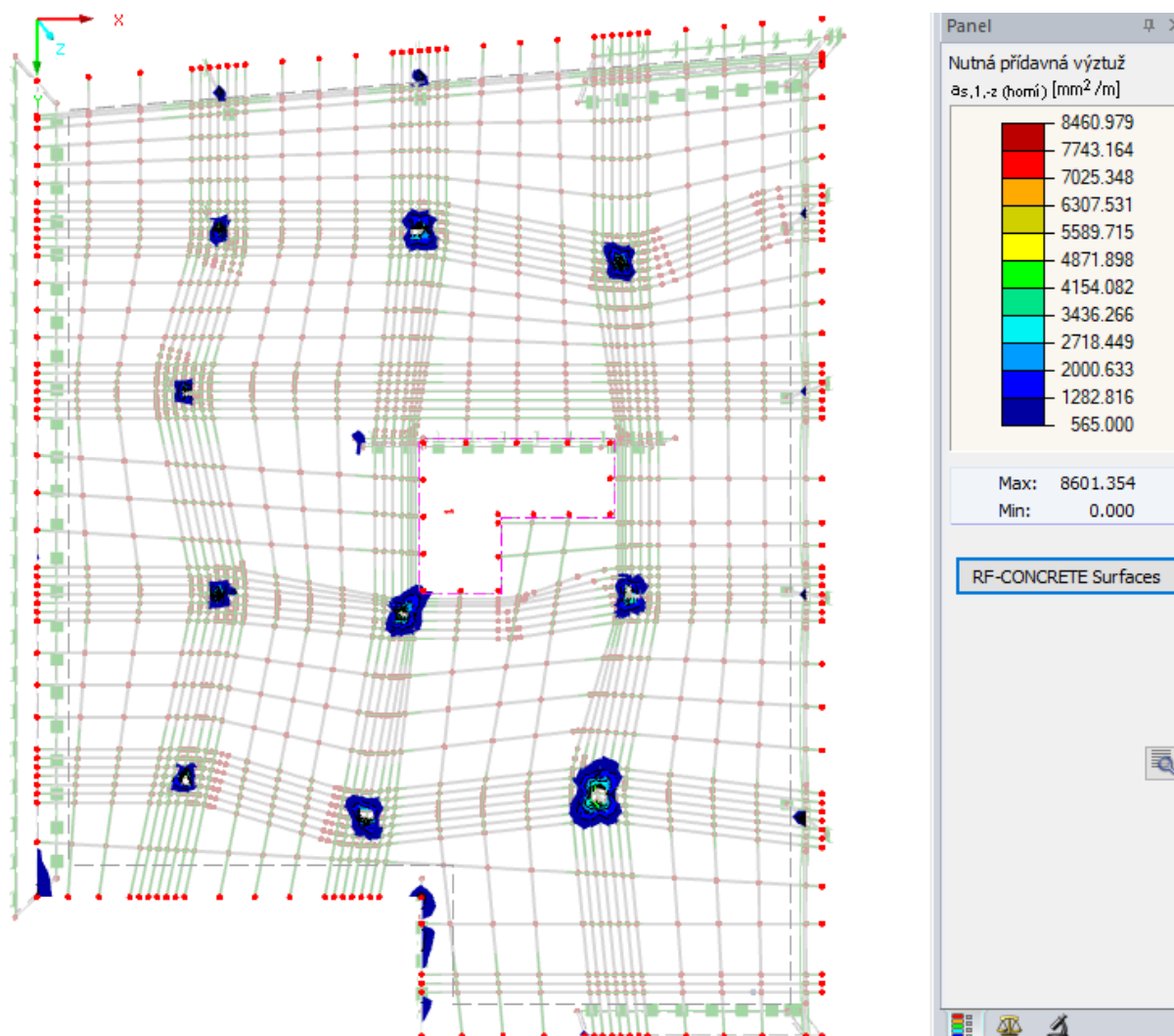
Byly uvažovány kombinace s třemi variantami rozmístění užitého zatížení. S ohledem na odlišnost užitečných zatížení se tyto kombinace jmenují – Q plné, Q šach 1 a Q šach 2. Kromě užitého zatížení (v hodnotě $3,7 \text{ kN/m}^2$) tyto kombinace obsahují zatěžovací stavy stálé zatížení (automaticky generovaná vlastní tíha + $2,2 \text{ kN/m}^2$ ostatní stálé) a předpětí (automaticky generované ekvivalentní zatížení). Tyto zatěžovací stavy se dále kombinují podle pravidel uvedených v kapitole 5.3.



Obrázek 9.7 – zatěžovací stavy Q šach 1 a Q šach 2

10. Posouzení mezního stavu únosnosti

Posouzení mezního stavu únosnosti bylo provedeno v modulu RF-Surfaces. Deska byla v celé své ploše vyztužena betonářskou výztuží $\varnothing 12/200$ ($565 \text{ mm}^2/\text{m}$) B500B v obou směrech a u obou povrchů. Modul RF-Surfaces vyhodnocuje, zda je potřeba přídatná výztuž a tento požadavek graficky zobrazí. Posouzení bylo provedeno na konci životnosti konstrukce, kdy příznivě působící ekvivalentní zatížení od předpětí poklesne a konstrukce je více namáhaná. Byl posuzován pouze ohyb. Na obrázku 10.1 můžeme vidět graficky znázorněnou potřebu přílohek výztuže pro směr 1 (směr osy x) při horním povrchu. Bohužel se nepodařilo průměrovat vnitřní síly nad sloupy, proto potřebu přídatné výztuže v místech singularit musíme brát s rezervou.



Obrázek 10.1 – nutná přídatná výztuž $a_{s,1,-z}$ (horní povrch, směr osy x)

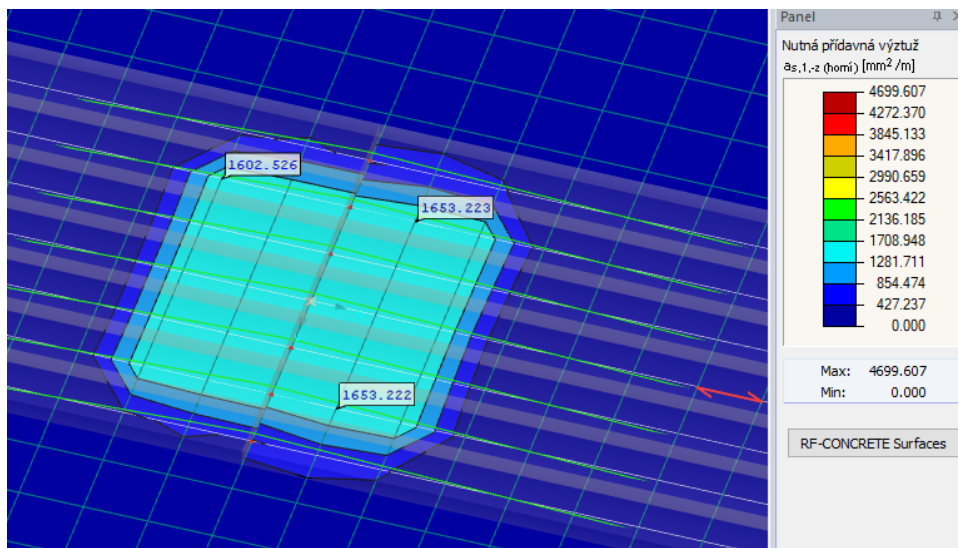
Průměrování vnitřních sil se podařilo na zjednodušeném modelu, kde vedl sloupový pruh přes pole o rozpětí 10 a 15 m. Výsledná potřeba výztuže 1650 mm^2 se dá považovat za reálně nutnou hodnotu pro jeden směr sloupového pruhu při horním povrchu. Předdefinované vrstvy výztuže mají plochu $565 \text{ mm}^2/\text{m}$ v jednom směru, při jednom povrchu. V místech podpor zmenšíme vzdálenost prutů na čtvrtinu, tj. 50 mm, desku tak bude vyztužena plochou $2260 \text{ mm}^2/\text{m}$ v jednom směru, při jednom povrchu. Oba povrchy konstrukce budou v místech se zesílenou výztuží vyztuženy symetricky. Konstrukce vyhoví.

V polích není potřeba přílozek při spodním povrchu na žádném místě. Potřeba přílozek při spodním povrchu se zobrazuje pouze v podporových oblastech a to na velice malé ploše. Proto zde nejsou uvedeny graficky znázorněné výsledky. Zde je beton v tlaku. Beton při spodním povrchu bude pro jistotu v podporových oblastech vyztužen zesílenou výztuží shodnou se zesílenou výztuží při horním povrchu. Konstrukce vyhoví.

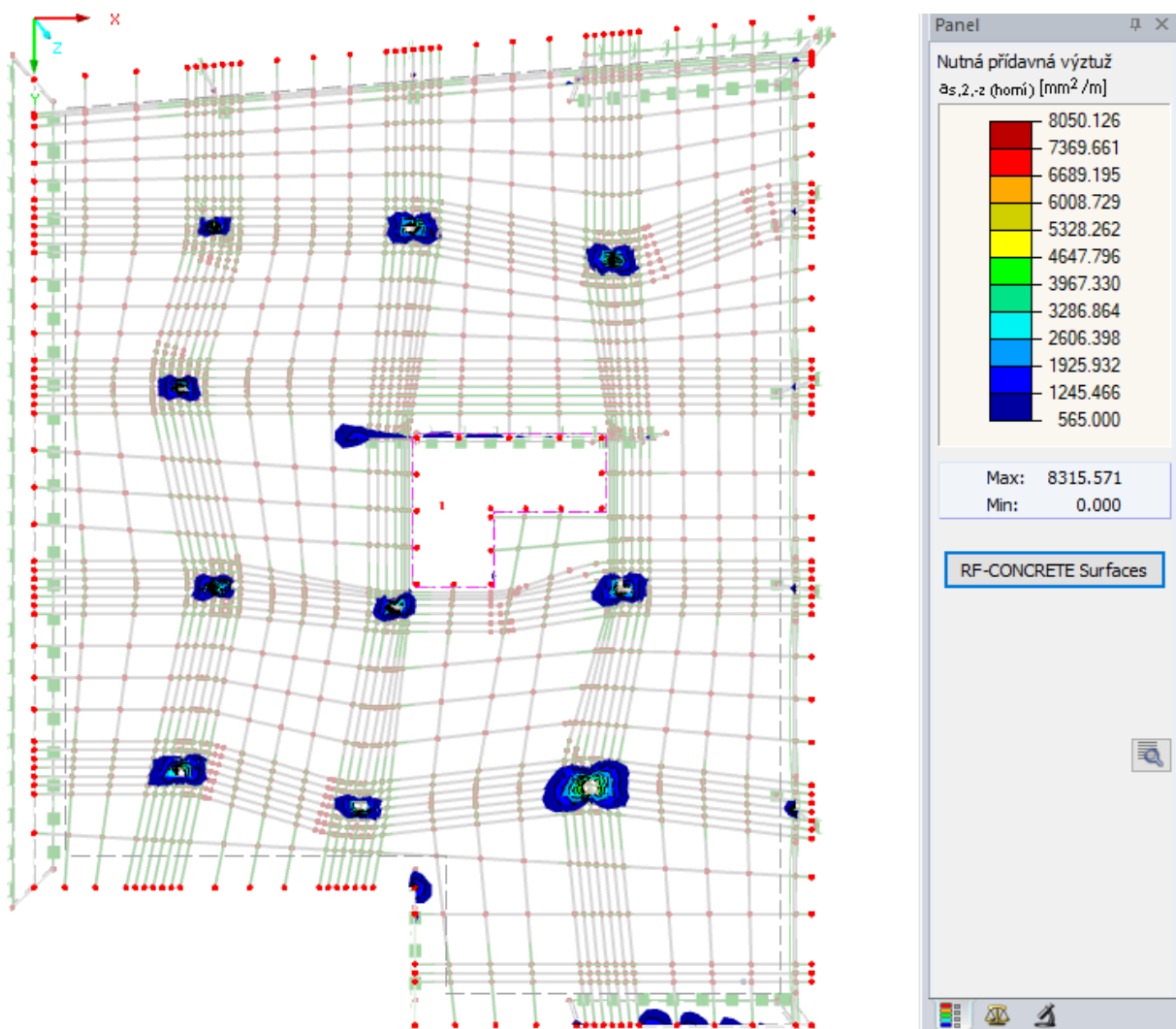
Na obrázku 10.4 můžeme vidět schematicky znázorněné příložky výztuže. Směr 1 (osa x) a 2 (osa y) jsou v některých místech vyztuženy v rozdílné šířce. To je dáno rozdílnou potřebou výztuže pro oba směry, viz obrázky 10.1 a 10.3.

Modul RF-Surfaces nepočítá v mezním stavu únosnosti s kabely předpínací výztuže, které by v podporových oblastech a obecně v místech sloupových pruhů tvořily významný příspěvek k únosnosti. Modul RF-Surface automaticky zohledňuje materiálové součinitele podle platných norem. Největší účinek vyvozovala kombinace s užitným zatížením Q plné.

Při návrhu sloupového pruhu byl tento vyztužen betonářskou výztuží $\varnothing 12/100$. Využití v poli z hlediska MSÚ bylo 88% a to i při započítání předpínací výztuže k únosnosti. Nyní je model vyztužen pouze betonářskou výztuží s poloviční plochou, a přesto v poli vyhoví. To lze vysvětlit tak, že v poli sloupového pruhu ve skutečnosti vzdoruje ohybu širší průřez, než sloupový pruh šířky 3,5 m.

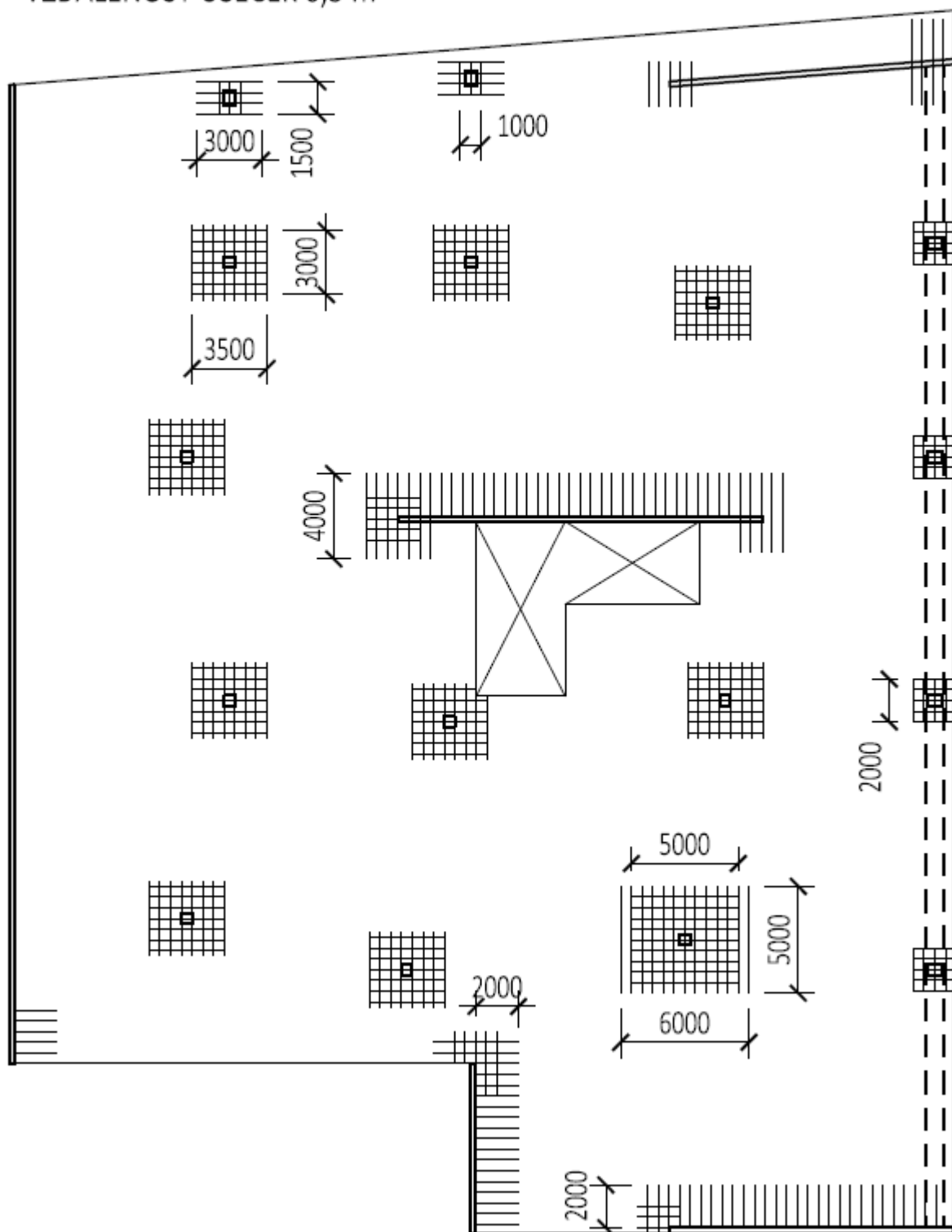


Obrázek 10.2 – nutná přídavná výztuž po průměrování vnitřních sil



Obrázek 10.3 – nutná přídavná výztuž $a_{s,2,-z}$ (horní povrch, směr osy y)

DOVYZTUŽENÍ NA Ø12/50 PRO OBA POVRCHY V ZOBRAZENÉM SMĚRU
VZDÁLENOST ÚSEČEK 0,5 m



Obrázek 10.4 – zesílení výztuže

11. Posouzení mezního stavu použitelnosti

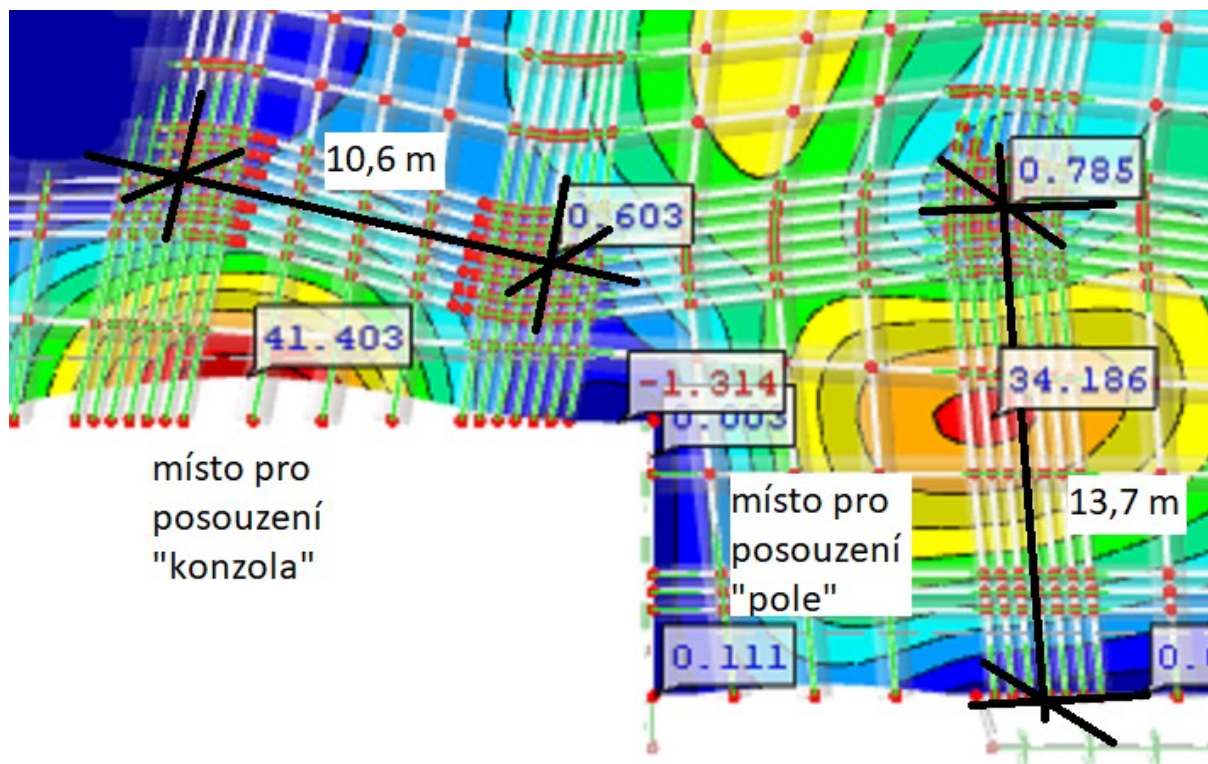
V modulu RF-Surfaces se posouzení mezního stavu použitelnosti váže na výztuž stanovenou pro mezní stav únosnosti [9]. V místech, kde nedostačuje předdefinovaná výztuž, se počítá i s nutnou přídatnou výztuží. Výpočet průhybů desky probíhal nelineárně, bylo zohledněno dotvarování a smršťování. Jisté omezení vzniklo v oblasti průvlaku – RF–Surface počítá nelineární deformace pouze u ploch. Deformace v oblasti průvlaku tedy neodpovídají realitě. Dlouhodobé ztráty nelze v programu RFEM a jeho modulech zohlednit přímo. Byly zohledněny pomocí součinitele 0,89 před zatěžovacím stavem předpětím v jednotlivých kombinacích. Tento součinitel byl vypočten jako poměr napětí po dlouhodobých ztrátách ku napětí po krátkodobých ztrátách u sloupového pruhu a průvlaku, viz kap. 7 a 8.

Průhyby byly počítány pro kvazistálou kombinaci zatížení. Průhyby byly posuzovány s ohledem na vzhled a obecnou použitelnost konstrukce, nesměly tedy při kvazistálé kombinaci zatížení překročit hodnotu 1/250 rozpětí. Pro posouzení byly vybrány v konstrukci dvě kritická místa – „konzola“ a „pole“, viz obrázek 11.1. U místa pole nebyl problém s určením vztažných podpor. U místa konzola byla vybrána vzdálenost mezi dvěma nejbližšími sloupy. V posledním řádku tabulky 11.1 se posuzují průhyby při částečném předpětí, viz kapitola 12. Jde o variantu, kdy předpětí bylo pouze ve sloupových pruzích, v deskových pruzích byly kabely deaktivovány.

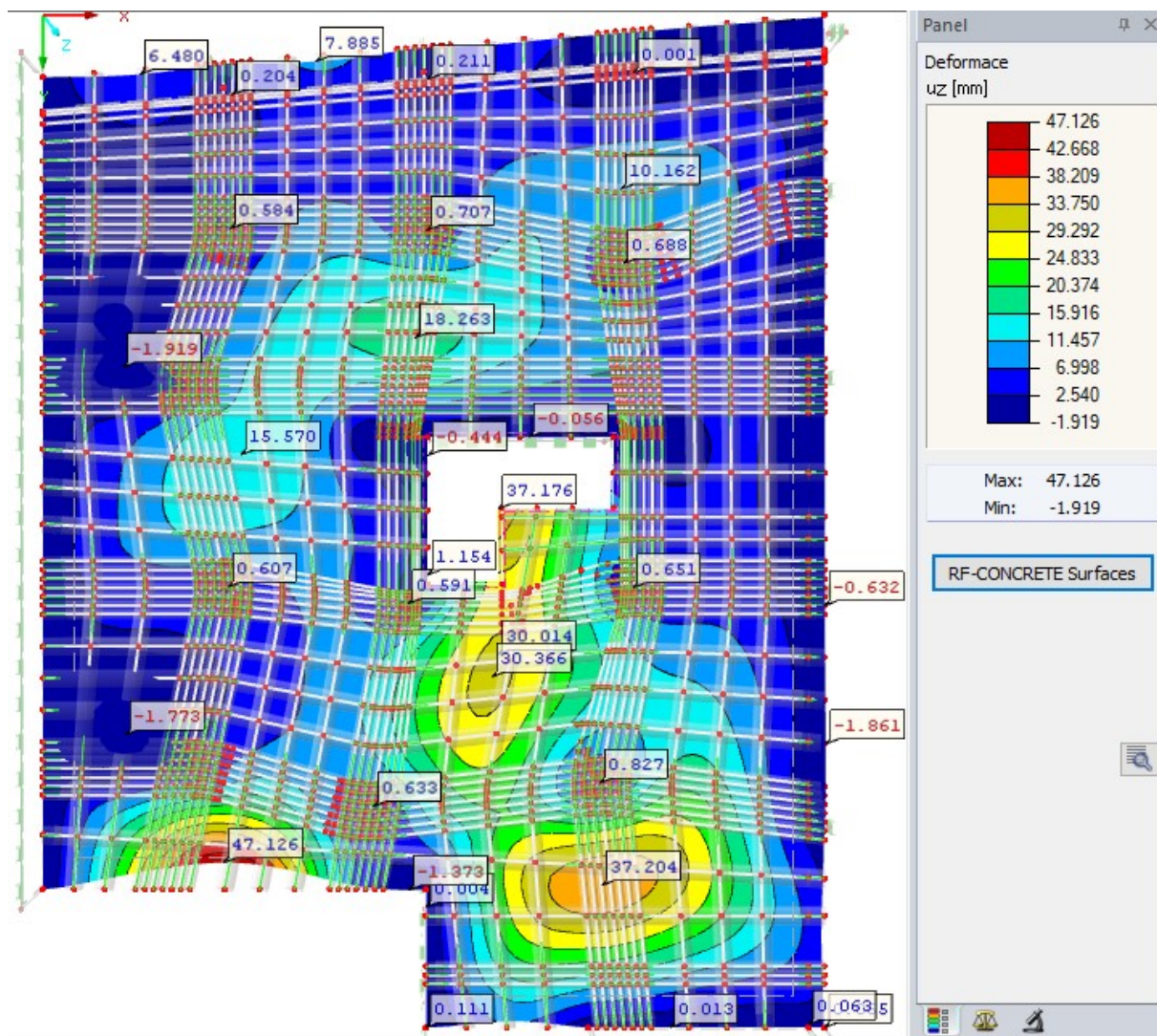
Tabulka 11.1 – posouzení průhybů

Komb. zatížení	Předpětí	Fáze životnosti	Konzola			Pole		
			1/250 [mm]	Průhyb [mm]	Posudek	1/250 [mm]	Průhyb [mm]	Posudek
Q plné	Ano	60 dní	42,4	25,5	OK	54,8	19,0	OK
Q plné	Ne	nek.	42,4	96,8	NEV.	54,8	83,7	NEV.
Q plné	Ano	nek.	42,4	47,1	NEV.	54,8	37,2	OK
Q šach1	Ano	nek.	42,4	41,4	OK	54,8	34,2	OK
Q šach2	Ano	nek.	42,4	46,2	NEV.	54,8	33,7	OK
Q plné	Částečně	nek	42,4	50,2	NEV.	54,8	43,3	OK

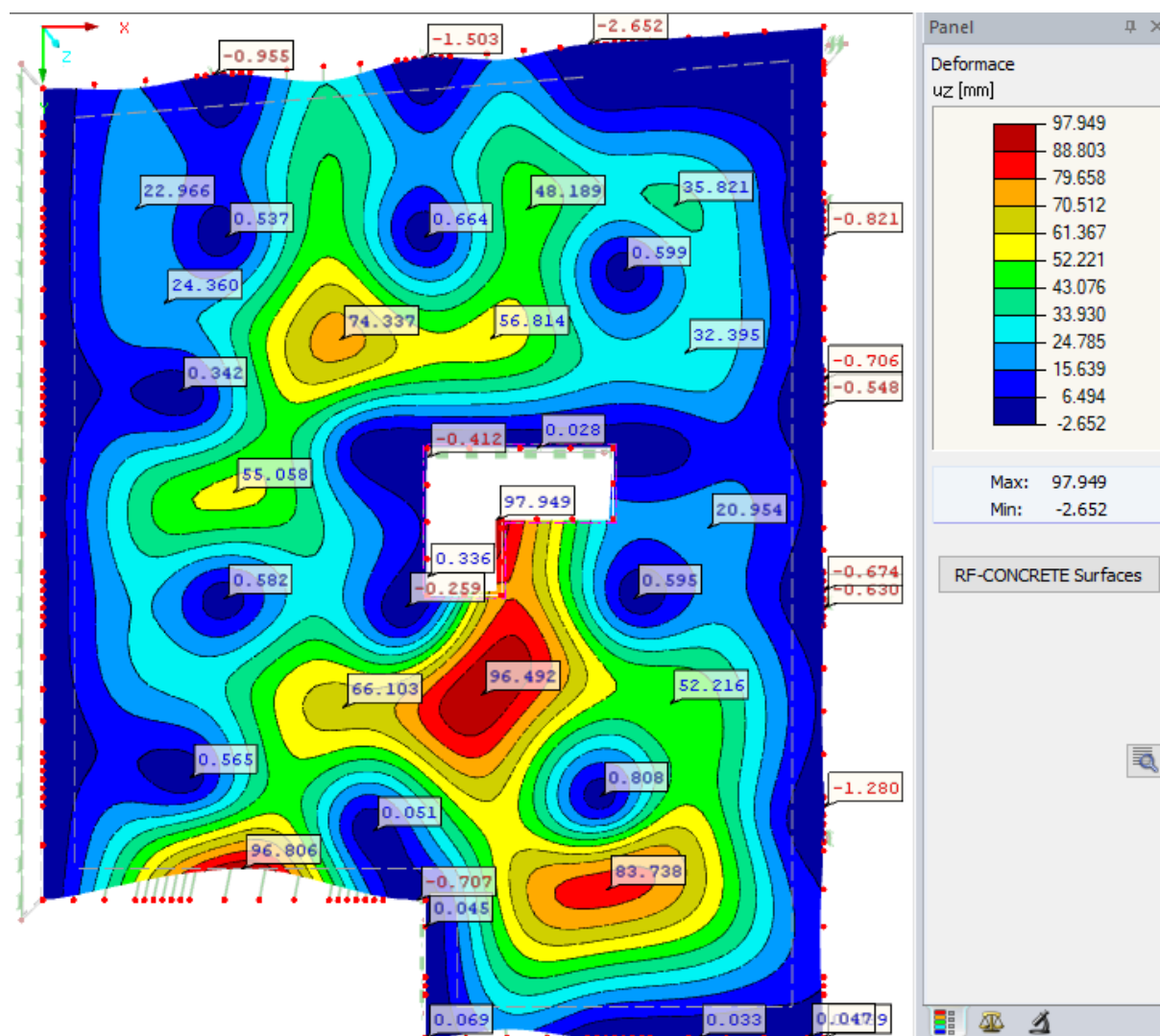
Při srovnání posouzení v 60 dnech a na konci návrhové životnosti vidíme, že dotvarování a smršťování se výraznou měrou projeví v narůstajícím průhybu konstrukce. Na konci životnosti je průhyb téměř dvojnásobný. Dále můžeme vidět, že šachovnicově umístěné užité zatížení nedokáže (v případě této konstrukce a tohoto užitého zatížení) vyvodit větší průhyby, než plné užité zatížení.



Obrázek 11.1 – místa posouzení



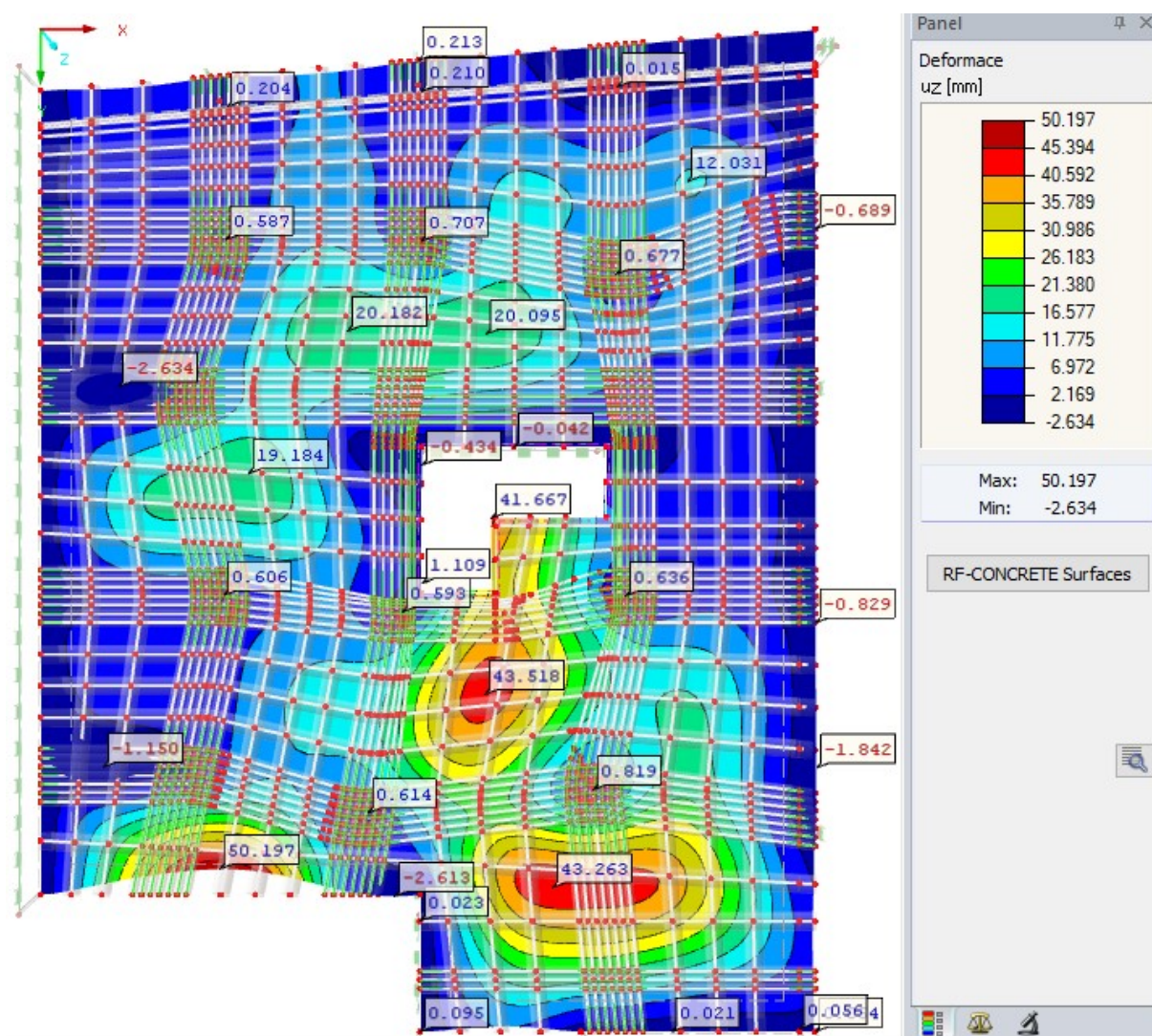
Obrázek 11.2 – nelineární deformace, konec životnosti, kombinace Q plné



Obrázek 11.3 - nelineární deformace, bez předpětí, konec
návrhové životnosti, kombinace Q plné

12. Varianta předpětí

Mezi prvotními návrhy této práce bylo provést předpětí pouze ve sloupových pruzích. Záhy se však práce ubírala směrem, kdy se počítalo s předpětím i v deskových pruzích. Důvodem byla úvaha o desce s rozpětím 12 m v obou směrech, která po zmenšení o sloupové pruhy bude mít rozpětí 9 m v obou směrech, což je stále značná hodnota pro betonovou konstrukci. Na modelu konstrukce však lze ověřit i tuto variantu. Byly smazány dimenzační dílce v modulu RF-Tendon a tím zmizelo předpětí z deskových pruhů (na obrázku 12.1 sice výsledkové pruhy v deskových pruzích vidíme, ale nejsou v nich kabely – zelená barva). Ve srovnání s úplným předpětím lze zaznamenat zvětšené průhyby v polích, a to až o 13 milimetrů. Tento rozdíl již může rozhodovat o tom, zda konstrukce vyhoví či nevyhoví normovým požadavkům na průhyby.



Obrázek 12.1 – nelineární deformace, částečné předpětí, konec návrhové životnosti, kombinace Q plné

13. Závěr

Byla navrhnutá a posouzena deska z předpjatého betonu. Byly posouzeny a srovnány různé přístupy návrhu – návrh pomocí 1D konstrukcí a ověření na trojrozměrné konstrukci. Bylo zjištěno, že návrh předpětí pomocí sloupového pruhu nemusí dávat vždy přesné výsledky, protože ve skutečnosti vzdoruje ohybu širší průřez, než jen sloupový pruh. Bylo zjištěno, že konstrukce je díky své nepravidelnosti na samé hraně možnosti návrhu, protože vysoké zakřivení kabelů prudce snižuje předpínací sílu a potažmo ekvivalentní zatížení. Z průhybů okraje desky „konzoly“ je jasné, že velké vyložení konzoly nelze eliminovat při zvoleném konstrukčním řešení ani předpětím. Dále bylo zjištěno, že použití předpínacích kabelů v deskových pruzích nezanedbatelně ovlivní deformace konstrukce.

14. Poděkování

Děkuji Ing. Pavlíně Matečkové, Ph.D. a doc. Ing. Jaroslavu Navrátilovi CSc. za vstřícnost, odborné rady a čas věnovaný konzultacím.

15. Seznam použitých pramenů

- [1] VÍTEK, Jan. *Historie předpjatého betonu*. Praha: ČKAIT, 2016. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87438-84-8.
- [2] VSL SYSTÉMY /CZ/: Reference – Technická knihovna. Dostupné z <http://www.vsl.cz/reference/>
- [3] BETON TKS, s.r.o.: Archiv. Dostupné z http://www.betontks.cz/sites/default/files/2009-6-10_0.pdf
- [4] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2006.
- [5] European Technical Approval ETA-13/0978. *VSLab® S system*.
- [6] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitné zatížení pozemních staveb*. Český normalizační institut, 2003.
- [7] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Český normalizační institut, 2003.
- [8] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.
- [9] RF-CONCRETE Surfaces, *Popis programu*. Dlubal Software s.r.o., Anglická 28, 120 00 Praha 2.

16. Přílohy

Příloha 1: Výpis z programu IDEA k posouzení sloupového pruhu nad podporou v čase 60 dní.

Příloha 2: Výpis z programu IDEA k posouzení průvaku nad podporou na konci návrhové životnosti.

Příloha 3: Půdorys původní

Příloha 4: Půdorys upravený

Příloha 5: Půdorys předpětí